



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Volum I

Memòria – Pressupost

TREBALL DE FI DE GRAU



EFECTE DE LA PREDEFORMACIÓ EN LA RESISTÈNCIA AL DESGAST DELS ACERS INOXIDABLES AUSTENÍTICS METASTABLES

TFG presentat per obtenir el títol de GRAU en
ENGINYERIA MECÀNICA

Per **Marc Escolà Lamora**

Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Gemma Fargas Ribas

Departament de CMEM

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDEX MEMÒRIA

Índex memòria.....	1
Resum.....	3
Resumen	4
Abstract	5
Agraïments	6
Capítol 1: Introducció.....	7
1.1. Els acers inoxidables	7
1.1.1. Classificació.....	8
1.1.2. Nomenclatura.	10
1.2. Els acers inoxidables austenítics	11
1.2.1. Composició química	11
1.2.2. Influència dels elements d'aliatge.....	12
1.2.3. Microestructura	14
1.2.4. Tractament tèrmic.....	14
1.2.5. Propietats físiques.	14
1.2.6. Propietats mecàniques.	15
1.3. Els acers inoxidables austenítics metastables	16
1.3.1. La transformació martensítica.....	17
1.4. Tribologia	22
1.4.1. Fricció.....	22
1.4.2. Desgast.	22
1.4.3. Desgast per adhesió.	23
1.4.4. Desgast abrasiu.	23
1.4.5. Desgast per fatiga.	24
1.4.6. Desgast per corrosió.....	25
1.4.7. Desgast en acers inoxidables austenítics.	25
Capítol 2: Procediment experimental.....	29
2.1. Material estudiat.....	29
2.1.1. Composició química.....	30
2.1.2. Microestructura.....	30
2.1.3. Propietats físiques.	32
2.1.4. Propietats mecàniques.	33

2.2.	Metodologia	33
2.3.	Preparació de les mostres	34
2.4.	Caracterització de la superfície	39
2.4.1.	Rugositat	39
2.4.2.	Perfilòmetre o Microscòpia Mecànica de rastreig	41
2.4.3.	Microscopi òptic confocal	43
2.4.4.	Microscopi òptic de rastreig (SEM)	44
2.4.5.	Difracció de Raig-X	45
2.4.6.	Temperatura superficial	48
2.5.	Caracterització mecànica	49
2.5.1.	Assaig de desgast	49
2.5.2.	Microduresa	50
2.6.	Anàlisi del desgast	53
2.6.1.	Mètode del volum desgastat a partir de la pèrdua de pes	53
2.6.2.	Mètode del volum desgastat amb perfilòmetre-2D	54
2.6.3.	Mètode del volum desgastat amb perfilòmetre-3D	56
Capítol 3: Resultat i discussió		58
3.1.	Cinètica de desgast	58
3.1.1.	Pèrdua de pes	58
3.1.2.	Volum d'acer desgastat	60
3.1.3.	Velocitat de desgast (wear rate)	64
3.2.	Anàlisi de les petjades de desgast	67
3.2.1.	Apilaments	67
3.2.2.	Coeficient de fricció	70
3.2.3.	Perfil de dureses	73
3.2.4.	Transformació de fase martensítica	81
3.2.5.	Mecanisme de desgast	90
Capítol 4: Conclusions		93
Capítol 5: Pressupost		95
Capítol 6: Bibliografia		97

RESUM

L'acer inoxidable austenític metastable forma part de la família dels acers d'alta resistència que s'utilitzen actualment en el desenvolupament de vehicles més lleugers. Es caracteritza per ser susceptible a la transformació martensítica sota l'acció d'una deformació plàstica, fet que li confereix un seguit de propietats mecàniques molt adequades per al sector de l'automoció. Tot i així, el grau en el que es produeixi la transformació martensítica pot afectar directament a la capacitat de deformar plàsticament, així com el seu comportament a fatiga, fent que en molts casos sigui difícil predir la seva resposta mecànica. La gran majoria d'estudis que es troben en la bibliografia estan dedicats a analitzar l'efecte de la presència de fase martensítica en acers sotmesos a tracció i/o fatiga a baix i alt nombre de cicles però hi ha molt poca informació relacionada amb la repercussió enfront al desgast. Des d'aquest punt de vista, en aquest projecte s'ha analitzat i avaluat la resposta al desgast de l'acer inoxidable austenític metastable EN 1.4318 (AISI 301 LN), en quatre condicions de partida diferents; una en estat de recuit i tres en estat de laminat en fred amb diferents percentatges de martensita.

Els assajos s'han realitzat amb un tribòmetre per a distàncies entre 100 i 1000 m, a diferents càrregues per a una mateixa velocitat de lliscament. S'ha determinat la cinètica de desgast per a cada condició de material mitjançant dos mètodes diferents: mètode de la pèrdua de pes i mètode del volum desgastat. S'han analitzat les petjades de desgast mitjançant un rugosímetre i avaluat el mecanisme de desgast a partir de la tècnica de microscòpia electrònica de rastreig. D'altra banda, l'avaluació de la transformació martensítica originada al llarg dels assaigs de desgast s'ha dut a terme a partir de la tècnica de difracció de raig-X i del perfil de dureses en la secció transversal sota la petjada de desgast.

Els resultats mostren que a mesura que augmenta la quantitat inicial de fase martensítica disminueix la resistència al desgast de l'acer. No obstant, s'observa que la velocitat de desgast va disminuint al llarg del temps i s'estabilitza a un valor que és més elevat quan més gran sigui el percentatge inicial de martensita. L'anàlisi de les petjades de desgast posa de manifest que el mecanisme de desgast predominant, en les condicions de desgast estudiades, és la tribocorrosió i aquest es desenvolupa de forma similar indistintament del contingut inicial de martensita.

RESUMEN

El acero inoxidable austenítico metastable forma parte de la familia de los aceros de alta resistencia que se utilizan actualmente en el desarrollo de vehículos más ligeros. Se caracteriza por ser susceptible a la transformación martensítica bajo la acción de una deformación plástica, hecho que le confiere un conjunto de propiedades mecánicas muy adecuadas para el sector de la automoción. Sin embargo, el grado en el que se produce la transformación martensítica puede afectar directamente a la capacidad de deformar plásticamente como en su comportamiento a fatiga, haciendo difícil en muchos casos predecir su respuesta mecánica. La gran mayoría de estudios que se encuentran en la bibliografía están dedicados a analizar el efecto de la presencia de fase martensítica en aceros sometidos a tracción y/o fatiga a bajo y alto número de ciclos, pero hay muy poca información relacionada con la repercusión frente al desgaste. Des de este punto de vista, en este proyecto se ha analizado y evaluado la respuesta al desgaste del acero inoxidable austenítico metastable EN 1.4318 (AISI 301 LN), en cuatro condiciones de partida diferentes; una en estado de recocido y tres en estado de laminado en frío con distintos porcentajes de martensita.

Los ensayos se han realizado con un tribómetro para distancias entre 100 y 1000m, a diferente carga por una misma velocidad de deslizamiento. Se han determinado la cinética de desgaste para cada condición de material mediante dos métodos diferentes: método de la pérdida de peso y método del volumen desgastado. Se han analizado las huellas de desgaste mediante rugosímetro y evaluado el mecanismo de desgaste a partir de la técnica de microscopia electrónica de barrido. Por otro lado, la evaluación de la transformación martensítica originada a lo largo de los ensayos de desgaste se ha llevado a cabo a partir de la técnica de difracción de rayos-X y del perfil de dureza en la sección transversal bajo la huella de desgaste.

Los resultados muestran que a medida que aumenta la cantidad inicial de fase martensítica disminuye la resistencia al desgaste del acero. Sin embargo, se observa que la velocidad de desgaste va disminuyendo a lo largo del tiempo y se estabiliza a un valor que es más elevado cuando más grande sea el porcentaje inicial de martensita. El análisis de las huellas de desgaste pone de manifiesto que el desgaste predominante, en las condiciones de desgaste estudiadas, es la tribocorrosión y este se desarrolla de forma similar indistintamente del contenido inicial de martensita.

ABSTRACT

Metastable austenitic stainless steel belongs to the steel group named advanced high-strength steels currently used in the development of lighter vehicles. They are characterized to display martensitic transformation induced by plastic deformation, which enhance mechanical properties in a way that became potential candidates for automotive industry. However, the degree to which the martensitic transformation can occur directly affect the capability to deform plastically together with its fatigue behaviour, often making it difficult to predict the mechanical response. Numerous studies can be found in the literature related to the effect of the martensitic phase considering tensile and/or fatigue at low and high number of cycles, but there is little information regarding the impact against wear. In this way, the aim of this project is to evaluate the wear response of a metastable austenitic stainless steel EN 1.4318 (AISI 301 LN) in four different conditions; one annealed and three cold rolled with different percentages of martensite.

Wear tests have been performed using a tribometer for distances between 100 and 1000m at different loads for the same sliding speed. Wear volume is determined using weight loss measurements and wear track profile method. Wear tracks are analysed by profilometry and scanning electron microscopy. Moreover, the evaluation of the martensitic transformation that appears during wear tests has been carried out by of X-ray diffraction and the hardness profile of the cross section under the wear track.

The results show that wear resistance decrease at increasing the initial amount of martensite. However, it is important to point out that wear rate progressively decrease and stabilizes at long distances being higher for the steel with initial high percentage of martensite. The analysis of the wear tracks reveals that tribocorrosion is the predominant wear mechanism that develops indistinctly of the initial content of martensite.

AGRAÏMENTS

Agraeixo especialment a la meva tutora, la Dr. Gemma Fargas pels seus consells i coneixements, així com pel seu suport i dedicació en tot moment. També agrair als tècnics de laboratori, Álvaro Mestra, Fernando García i Francesc Heredero pels consells i l'ajuda.

Agraeixo també al Joan Josep Roa per haver-me ajudat de forma altruista sempre que ho he necessitat. I a l'Isaac López per l'anàlisi d'imatges mitjançant SEM i per ajudar-me i aconsellar-me en l'ús del microduròmetre.

Per últim, agraeixo sincerament al meu amic i company projectista Hugo Méndez per l'ajuda, els consells i el suport durant la realització del projecte.

CAPÍTOL 1:

INTRODUCCIÓ

1.1. Els acers inoxidable

Els acers són aliatges de ferro amb una quantitat de carboni inferior al 2,1% de la massa. La norma UNE-EN 10088 defineix els acers inoxidable com aquells aliatges fèrrics que contenen una proporció de crom mínima del 10,5%. També es caracteritzen per presentar altres elements d'aliatge com níquel (Ni), molibdè (Mo), manganès (Mn), silici (Si), titani (Ti), que els hi confereixen en general una millor resistència a la corrosió.

La corba de Tamman mostra com el percentatge de crom en l'aliatge afavoreix una menor pèrdua de pes en un medi corrosiu [1], (figura 1).

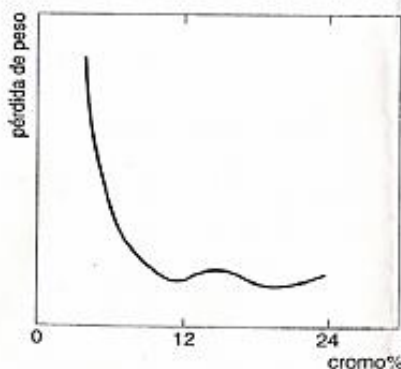


Figura 1. Representació de la corba de Tamman [1].

La bona resistència a la corrosió es deu a la propietat d'aquests aliatges d'experimentar un procés de passivació en un ambient suficientment oxidant, com seria l'aire, per mitjà de la formació d'una pel·lícula superficial d'òxid de crom.

A més a més, el crom disminueix la conductivitat tèrmica del ferro, la qual cosa li confereix refractarietat. Per tant, quan es desitja obtenir un comportament satisfactori en atmosferes seques oxidants, en altes temperatures, els acers solen ser d'alt contingut en Cr.

Els acers inoxidable es poden classificar en cinc famílies diferents segons els tractaments termomecànics aplicats i la seva estructura cristal·lina.

1.1.1. Classificació

Els acers inoxidable es poden classificar generalment en cinc famílies diferents segons la seva microestructura. En la qual hi influeix la composició química de l'acer, sobretot, els percentatges de crom i de carboni. D'aquesta manera es coneixen els acers inoxidable *ferrítics*, *martensítics*, *austenítics*, *dúplex* i *enduribles per precipitació*.

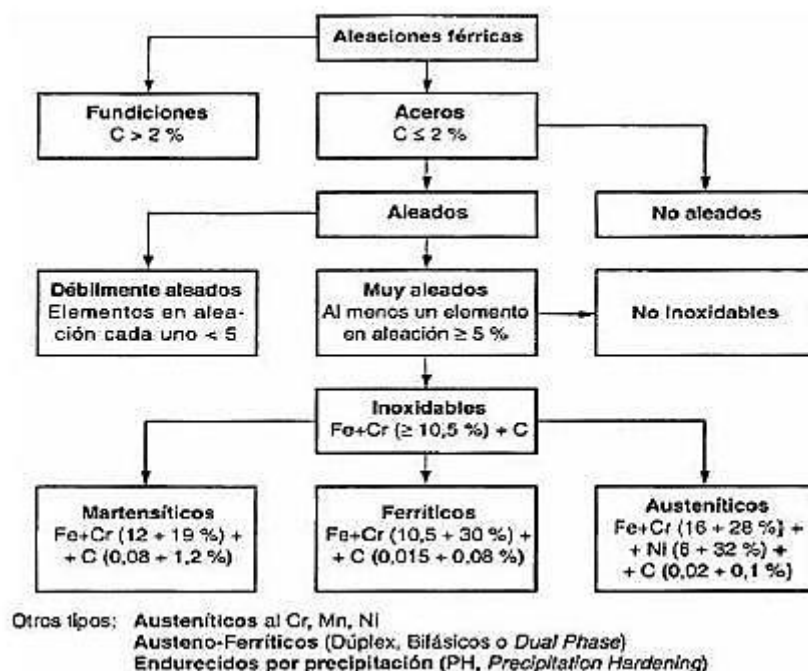


Figura 2. Classificació dels aliatges fèrrics [2].

- **Els acers inoxidable ferrítics** tenen un percentatge baix de carboni per evitar la formació de carburs en estat sòlid, que disminueixen la seva capacitat inoxidable, no ha de superar el 0,1% d'altra banda, el contingut de crom sol estar entre el 17% fins el 25%, afavorint una bona resistència a la corrosió. Aquest tipus d'acer es comporta bé en atmosferes oxidants

rurals i urbanes, tot i que en medis reductors es comporten pitjor que els inoxidable austenítics. En canvi, són gairebé immunes a la corrosió sota tensions en comparació als austenítics. Són sensibles al creixement del gra per escalfament a alta temperatura i experimenten certes formes de fragilitat. Tots els acers inoxidable ferrítics són magnètics i, per altra banda, tenen una baixa tenacitat i mediocre soldabilitat [2].

- **Els acers inoxidable martensítics** són històricament els primers acers inoxidable en aparèixer. Aquests acers tenen un contingut de crom entre el 12% i el 17% i de carboni entre 0,1% i 0,7%; d'aquesta manera aquests acers poden ser completament austenitzats i per tant poden ser trempats per obtenir estructures martensítics. Com major duresa i resistència mecànica es vulgui obtenir major ha de ser el contingut de carboni de l'acer. Així, aquests acers resulten més resistents que els acers ferrítics inoxidable, però en canvi la seva resistència a la corrosió es pitjor, ja sigui per la seva estructura martensítica que s'obté d'un trempat, com per l'aparició d'una gran quantitat de carburs després del revingut. Els acers inoxidable martensítics s'utilitzen per exemple en eixos trempats i revinguts per a bombes d'aigua, vàlvules, àleps de turbines, material odontològics y quirúrgic i eines inoxidable de duresa moderada com són ganivets, navalles, estisores, tornavisos, etc [2].
- **Els acers dúplex** són una combinació d'austenita i ferrita. Aquests tenen un contingut de crom del 22% al 26% i un percentatge de níquel de 4% a 7%. El contingut de carboni és inferior al 0,7%. Aquest tipus d'acer inoxidable té un bon equilibri de tenacitat, ductilitat, soldabilitat i resistència a la corrosió sota tensió i a la termofluència. A més a més, es poden endurir per treball en fred i com els anteriors són magnètics. Els acers dúplex s'utilitzen en l'indústria petroquímica, paperera i estructural en presència d'ions de clor [2].
- **Els acers inoxidable enduribles per precipitació**, tenen un contingut de crom del 17% i un percentatge de níquel baix, juntament amb altres elements d'aliatge. Aquests acers es poden treballar i mecanitzar en fred i tenen una bona resistència a la corrosió. A més, són tractables tèrmicament i endureixen per precipitació, la qual cosa permet mecanitzar en l'estat tou i fer el tractament d'enduriment posteriorment, sense pèrdua de geometria [2].
- **Els acers inoxidable austenítics** tenen un baix contingut de carboni, inferior o en tot cas igual al 0,1%C, per evitar la formació de carburs que comprometen la resistència a corrosió. La base d'aquests acers és una composició de 18% de crom i 8% de níquel. Molts d'aquests acers són sensibles a la corrosió intergranular, quan no han rebut un tractament tèrmic estabilitzant. Aquests acers, que són els més comuns comercialment, no són magnètics [2].

1.1.2. Nomenclatura.

La nomenclatura dels acers sol ser força enrevessada, ja que els països i les Institucions relacionada en la fabricació i l'ús d'acers utilitzen una forma pròpia per designar un mateix acer.

Per exemple, si ens fixem en l'acer inoxidable 304(AISI) són equivalents altres formes de nomenclatura: S30400(UNS), X5CrNi18-10(DIN), 1.4301(W.Nr.), etc. Únicament si s'observa el sistema americà, es pot observar un conjunt d'institucions per designar els acers i les seves normes de fabricació [3].

1.2. Els acers inoxidable austenítics

Tots els tipus d'acers inoxidable austenítics són fàcilment distingibles dels ferrítics i els martensítics; ja que degut a la seva estructura cristal·lina cúbica centrada a les cares no són magnètics i per tant es poden identificar mitjançant l'aplicació d'un iman.

Aquesta diferència rau en la seva composició química, ja que en els altres acers inoxidable el crom era l'únic element que apareixia en una quantitat considerable. En canvi, l'addició en aquests aliatges d'una quantitat suficient de níquel és el que ens permet obtenir l'acer inoxidable austenític, ja que conserva a temperatura ambient l'estructura gamma.

Per altra banda, com a conseqüència d'aquesta estructura, el seu allargament a ruptura supera al dels acers inoxidable ferrítics o martensítics. A més a més, són molt tenaços (inclòs a *temperatures criogèniques*) donat que la seva temperatura de transició dúctil/fràgil es de l'ordre de -200°C.

Els acers inoxidable austenítics es comporten molt bé a elevades temperatures, ja que la seva estructura cristal·lina es manté estable en un ampli rang de temperatures.

Aquests no presenten transformacions al·lotròpiques i per tant no es pot afinar la seva mida de gra per tractament tèrmic. No obstant, a diferència dels acers inoxidable ferrítics, una mida de gra gran gairebé no compromet la seva tenacitat [1].

1.2.1. Composició química

La composició química té una gran influència sobre l'estructura metal·lúrgica de l'acer, les propietats físiques i mecàniques i la resistència a la corrosió.

Els acers inoxidable austenítics, com s'ha comentat anteriorment, són essencialment aliatges de Fe-Cr-Ni, però hi ha molts altres elements que contribueixen a la diversitat de les seves propietats, com podria ser el molibdè i altres elements que esmentarem més endavant.

En aquests acers, els elements d'aliatge es classifiquen en funció de l'aportació a l'estabilització de les fases austenítiques (gammàgens) i martensítics (alfàgens). Els elements alfàgens són anomenats així degut a que afavoreixen una estructura cúbica centrada en el cos (BCC) en el ferro. Per contra, els anomenats gammàgens afavoreixen una xarxa cristal·lina FCC.

Com s'ha esmentat abans, els acers inoxidable austenítics contenen un percentatge molt baix de carboni inferior al 0,1%, mentre que el contingut de crom pot oscil·lar entre 12% i 25%, el contingut de níquel està entre el 8% i el 30%.

Taula 1. Composició química d'alguns acers inoxidable austenítics [4].

AISI	%C	%Si	%Mn	%P _{max}	%S	%N	%Cr	%Mo	%Ni
301	0,05 - 0,15	≤2	≤2	0,045	≤0,015	≤0,11	16-19	≤0,8	6-9,5
301LN	≤0,03	≤1	≤2	0,045	≤0,015	0,10-0,20	16,5-18,5	-	6-8
304	≤0,07	≤1	≤2	0,045	≤0,015	≤0,11	17-19,5	-	8-10,5
304LN	≤0,03	≤1	≤2	0,045	≤0,015	0,12-0,22	17-19,5	-	8,5-11,5
316	≤0,07	≤1	≤2	0,045	≤0,015	≤0,11	16,5-18,5	2-2,5	10-13
316LN	≤0,03	≤1	≤2	0,045	≤0,015	0,12-0,22	16,5-18,5	2,5-3	11-14

1.2.2. Influència dels elements d'aliatge.

Depenent del tipus d'aplicació i de les condicions de fabricació es desenvolupen acers que compleixin condicions específiques, basant-se en la influència aïllada o combinada d'elements d'aliatge sobre les propietats de l'acer.

El crom i el níquel constitueixen els dos elements d'aliatge primordials dels acers inoxidable. S'utilitzen també, altres elements la finalitat dels quals és la d'augmentar la resistència a la corrosió per via humida o millorar la resistència a l'oxidació, a alta temperatura; com el silici, el molibdè, el tungstè, el manganès, el nitrogen, el titani i el niobi, entre d'altres.

Els elements d'aliatge es divideixen entre els "alfàgens" que estableixen la ferrita (fase α) i els "gammàgens" que estableixen l'austenita (fase γ).

Elements d'aliatge alfàgens:

- **El Crom (Cr)** és l'element fonamental dels acers inoxidable, ja que l'acció d'aquest element consisteix en la formació d'una capa molt prima d'òxid sobre la superfície de l'acer, la qual es impermeable, insoluble i homogènia en el medi corrosiu quan el percentatge d'aquest element es superior al 10,5%. El crom forma part del grup d'elements anomenats *alfàgens* que augmenten el camp de l'existència del ferro alfa, disminuint el del ferro gamma.
- **El Silici (Si)** augmenta la resistència dels acers enfront l'oxigen, l'aire i els gasos oxidants calents, per tant és utilitzat principalment en els aliatges resistents a la calor. Al igual que el crom, és un element *alfàgen* que disminueix la superfície gamma, tot i que la seva influència en aquest aspecte és molt més pronunciada que amb el crom.

- **El Molibdè (Mo)** influeix sobre la passivitat i la resistència química dels acers inoxidable en els àcids reductors i en presència d'ions clor, davant de la qual la passivitat del crom es poc estable. Afavoreix la resistència mecànica en calent dels acers austenítics.
- **El Titani (Ti) i el Niobi (Nb)** juguen un paper molt particular en els acers austenítics. Aquests eviten la precipitació de carburs de crom durant els refredaments lents o durant els escalfaments de llarga duració a temperatures al voltant dels 700°C, impedit així la disminució local del contingut de crom de l'acer, que disminueix la resistència a la corrosió. A més, poden provocar fenòmens de precipitació en els acers austenítics que contribueixen en augmentar la rigidesa d'aquests aliatges en calent.

Elements d'aliatge gammàgens:

- **El Níquel (N)** és un element que augmenta la resistència en els medis lleugerament oxidants. L'acció d'aquest element no es limita solament a millorar la resistència a la corrosió, sinó que la seva presència modifica l'estructura de l'acer i permet obtenir aliatges dotats de millors característiques de ductilitat, resistència mecànica en calent i soldabilitat. El níquel, a diferència del crom, és un element *gammàgen* que actua augmentant el camp d'estabilitat de l'austenita. Així doncs, per exemple, els acers que contenen més de 24% de níquel presenten una estructura austenítica a temperatura ambient. D'altra banda, el níquel augmenta la capacitat de trempat dels acers, al disminuir la velocitat crítica de refredament.
- **El Carboni (C)** és un element *gammàgen* que amplia considerablement el camp d'estabilitat de l'austenita en els aliatges ferro-crom. No obstant, pot afectar a la resistència a la corrosió amb la formació dels carburs de crom, és per això que es troba en petites quantitats en els acers inoxidable austenítics.
- **El Wolfram o Tungstè (W)** no influeix sobre la resistència a la corrosió. No obstant, s'afegeix als acers austenítics (principalment del tipus 18-8) per millorar les seves característiques mecàniques en calent o en fred. Al igual que el crom i el silici també és *alfàgen*.
- **El Nitrogen (N)** actua en els acers al crom o al crom-níquel d'una manera anàloga a la del carboni, ja que és un element *gammàgen*. A causa d'aquesta propietat s'ha utilitzat aquest element per convertir en austenítics, acers en els quals s'hi havia disminuït el contingut de níquel per motius econòmics.

1.2.3. Microestructura

La microestructura dels acers inoxidable austenítics pot arribar a ser força complexa. Aquests són trempats per impedir la precipitació de fases no desitjades. Això genera una estructura austenítica amb poca densitat de dislocacions. Els defectes d'apilament tenen una facilitat de formació degut a la baixa energia de defectes per apilament (SFE) dels acers inoxidable austenítics. No obstant, molts carburs i fases intermetàl·liques poden ser presents i l'austenita pot ser parcialment transformada en dos tipus de martensita. [5]

1.2.4. Tractament tèrmic.

Les propietats físiques i mecàniques dependran del tractament tèrmic efectuat. El recuit, consisteix en un escalfament a temperatures pròximes als 1100°C seguit d'un refredament ràpid a l'aire o en aigua, condicions que difereixen al que s'aplica en general als acers al carboni. L'escalfament a alta temperatura és necessari per eliminar l'acritud, dissoldre la totalitat dels carburs i obtenir una solució sòlida homogènia austenítica. [2]

1.2.5. Propietats físiques.

Els diferents elements d'aliatge tindran un efecte molt important en aquestes propietats.

El *punt de fusió*, en comparació amb els acers ferrítics al crom, és inferior degut a la presència del níquel. Dins els acers inoxidable austenítics, l'adició del 2% o 3% de silici disminueix el punt de fusió.

La *densitat*, la *resistivitat elèctrica* i la *conductibilitat tèrmica* difereixen poc entre els diferents acers d'aquest tipus.

El *coeficient d'expansió tèrmica* és bastant major que el dels acers martensítics o ferrítics. [2]

Taula 2. Propietats físiques dels acers inoxidable austenítics [2].

Propietats	
Punt de fusió	1370-1430°C
Mòdul de Young	193 GPa
Resistivitat elèctrica	750 nΩm
Conductivitat tèrmica	12-15 W/mK
Densitat	7,8-8 g/cm ³
Expansió tèrmica	17,4-18,7 mm/mK

1.2.6. Propietats mecàniques.

Les *característiques mecàniques* de tracció dels diferents acers austenítics, determinades en estat de recuit per a un contingut de carboni comprès entre 0,05% i 0,10%, es troben en els següents valors:

Taula 3. *Propietats mecàniques de l'EN 1.4318 [4].*

Mechanical Properties	
Hardness HB _{max}	241
R _{p0,2} [MPa]	330
Tensile strength R _m [MPa]	650-830
Elongation after fracture [%]	45

Els valors del *límit elàstic* i de la *tensió de ruptura* augmenten progressivament a mesura que augmenta el conformat en fred i el contingut de carboni [2].

1.3. Els acers inoxidables austenítics metastables

Un acer inoxidable austenític conté simultàniament diferents elements i per tant la seva estructura està en funció de la suma de les seves aportacions respectives. En el diagrama de Schaeffler (figura 3) s'indica les estructures en funció de les equivalències dels diferents elements al·lògens o gammàgens. Aquest diagrama va ser traçat per Schaeffler [6], el qual va definir les següents equivalències:

$$\text{equivalent de Níquel} = \text{Ni} + 30 \cdot \text{C} + 0,5 \cdot \text{Mn} \quad (1)$$

$$\text{equivalent de Crom} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1,5 \cdot \text{Si} + 0,5 \cdot \text{Nb} \quad (2)$$

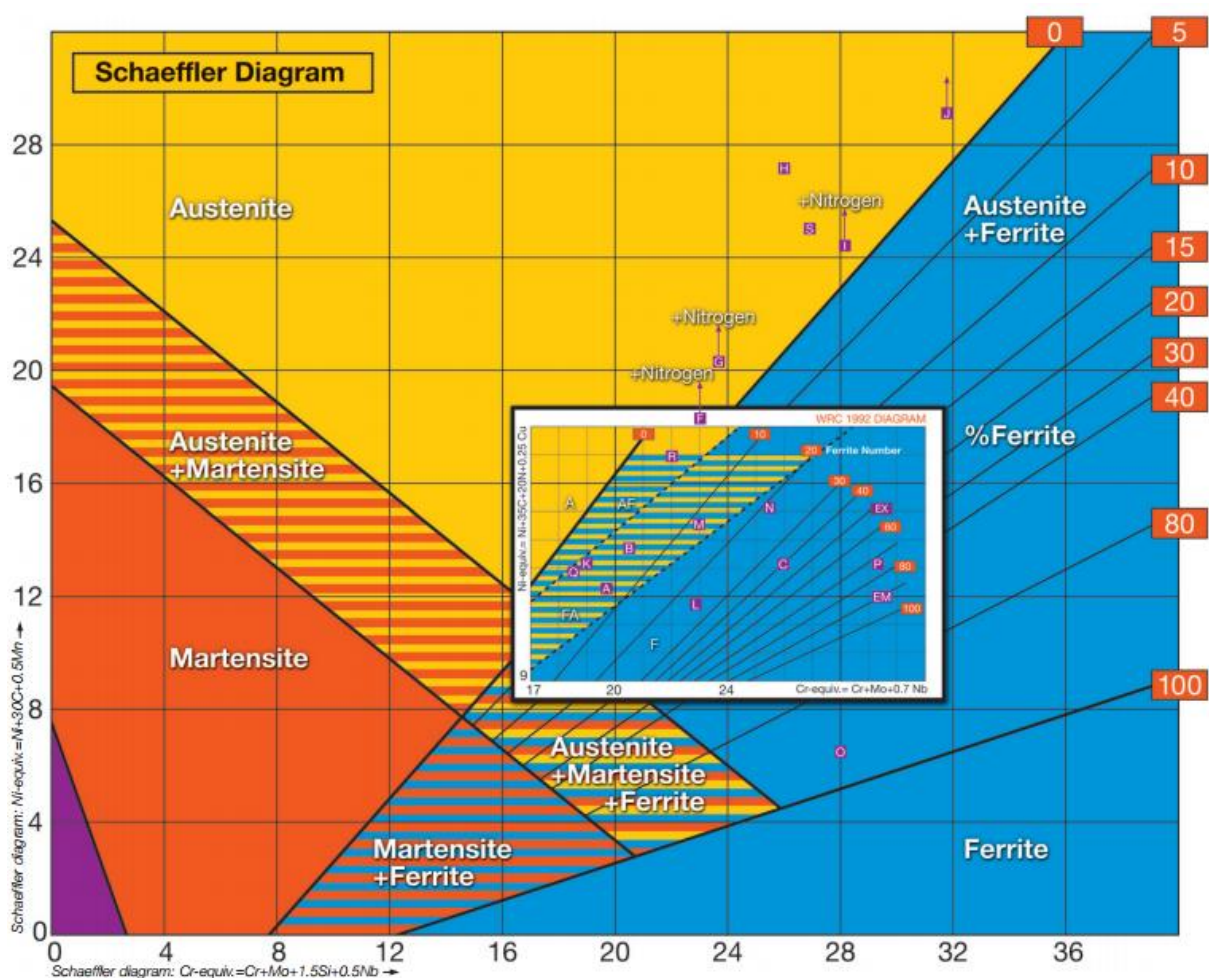


Figura 3. Diagrama de Schaeffler [6].

En el diagrama podem observar que els acers austenítics de baix aliatge s'acosten a la cantonada inferior esquerra. Aquests al estar tan a prop de la regió martensítica són anomenats **acers inoxidables austenítics metastables**, ja que són susceptibles a la transformació martensítica sota l'acció d'una

deformació. En canvi, els acers austenítics altament aliats al ser més estables no transformen en martensita durant la deformació [5].

Els acers inoxidable austenítics metastables es caracteritzen per presentar una bona resistència a la corrosió i bones propietats mecàniques, tot i que aquestes últimes es poden veure afectades per la transformació martensítica per deformació en fred.

El major inconvenient d'aquests acers és la dificultat de predir la resposta mecànica, ja que aquesta dependrà majoritàriament de la quantitat de martensita formada.

Un exemple d'acer inoxidable austenític metastable és l'AISI-301LN, que s'estudia en aquest projecte, i que es caracteritza per la bona ductilitat i conformabilitat. D'altra banda, presenta un enduriment per deformació extrema, que afavoreix un augment del límit elàstic i resistència mecànica, i en canvi una pèrdua de la ductilitat [5].

A continuació descriurem més en detall el procés de transformació martensítica per deformació.

1.3.1. La transformació martensítica.

Transformació martensítica d'austenita per refredament

El refredament ràpid (o tremp), fins a temperatures pròximes a l'ambiental, de l'acer austenitzat origina una microestructura denominada martensita. En la transformació martensítica un gran nombre d'àtoms es mouen de manera cooperativa, el que representa petits desplaçaments d'un àtom respecte els seus veïns, sense cap moviment de difusió. [7]

La martensita es forma quan es produeix un refredament molt ràpid fins a una temperatura final per sota de la temperatura M_s però per sobre de M_f . Aquesta temperatura depèn de la composició química de l'acer i pot ser calculada per l'equació de Pickering [8]:

$$M_s = 502 - 810 (\% C) - 1230 (\% N) - 13 (\% Mn) - 30 (\% Ni) - 12 (\% Cr) - 54 (\% Cu) - 46 (\% Mo) \quad (3)$$

Transformació martensítica d'austenita per deformació

L'austenita en els acers inoxidable austenítics presenta una estructura (FCC) cúbica centrada en les cares, la qual pot ser obtinguda per un apilament ABCABC... de plans $\{111\}$, on les variacions de la seqüència són qualificades de defectes d'apilament.

Quan es produeix el desplaçament de les dislocacions perfectes d'una estructura cristal·lina, es pot donar la dissociació d'una dislocació en dos de parcials, les quals han de tenir una energia inferior a la dislocació perfecta. Aquesta dissociació provoca un defecte d'apilament on la longitud dependrà de l'equilibri

entre les forces de repulsió de les dos dislocacions parcials i l'energia del defecte d'apilament (Stacking-fault energy, SFE) que tendeixes a apropar-les. [9]

Així doncs, una SFE elevada afavoreix la recombinació de les dislocacions parcials. Per contra, com més petita es la SFE, més difícil serà la recombinació de les dislocacions parcials, la qual cosa afavoreix altres mecanismes d'acomodació de deformació. Aquest mecanisme en els acers inoxidable austenítics metastables és la transformació martensítica. En canvi, una SFE elevada impedeix la formació de martensita ja que hi haurà formació i creixement de bandes de lliscament (figura 4) [10]:



Figura 4. Mecanismes de deformació en funció de la SFE.

Com s'ha dit anteriorment, la fase austenítica en els acers inoxidable metastables és susceptible de transformar-se en martensita induïda per deformació. Aquesta austenita pot ser de 2 tipus: martensita hexagonal compacta (HCP) denominada ϵ ; i la martensita cúbica centrada en el cos (BCC) denominada α' .

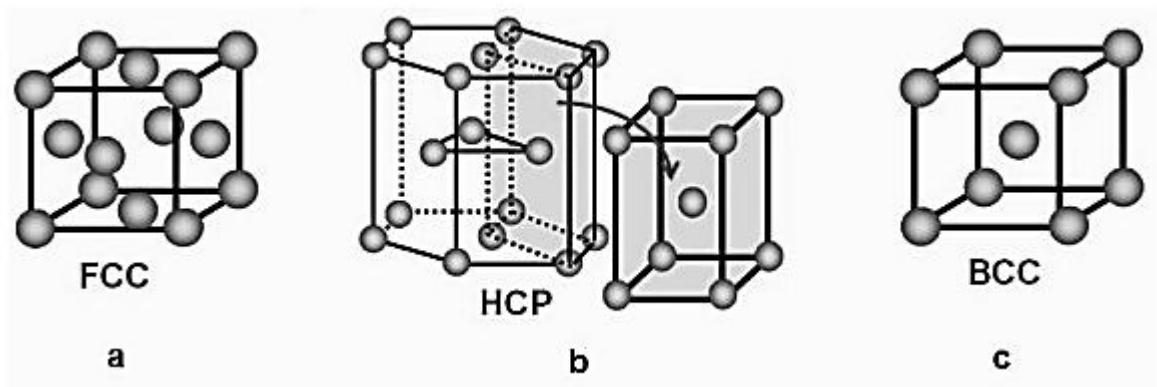
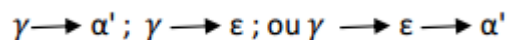


Figura 5. a) Austenita- γ (FCC); b) Martensita- ϵ (HCP); Martensita- α (BCC).

La martensita ϵ es forma en el començament de la deformació, però la seva fracció de volum disminueix a partir d'un cert grau de deformació plàstica. En canvi, el percentatge de martensita α' augmenta contínuament fins a trobar-se com a l'únic tipus de martensita present en l'acer quan els valors de deformació són alts. [11]

Com s'observa en la figura 5, una xarxa cúbica centrada en les cares pot ser considerada també com una xarxa tetragonal centrada en el cos [12]. Aquesta transformació es pot dur a terme d'acord amb els tres sistemes següents:



Així doncs, la transformació martensítica per deformació es produeix en els acers inoxidables, per als quals la SFE és baixa, formant-se martensita α directament; i/o la formació de martensita ϵ , la qual al ser poc estable acaba transformant-se en martensita α' [8].

Els realineaments atòmics associats amb les reaccions martensítiques produeixen deformacions de forma igual a les que es produeixen en el maclat mecànic. Així, el moviment dels àtoms durant la transformació martensítica s'assimila a un mecanisme de cisalla formant plaquetes de martensita. Aquest mecanisme origina una estructura transformada diferent a la de la fase original (austenita), però implica l'existència de relacions d'orientació entre les dues xarxes, com s'observa en la figura 6 [12]:

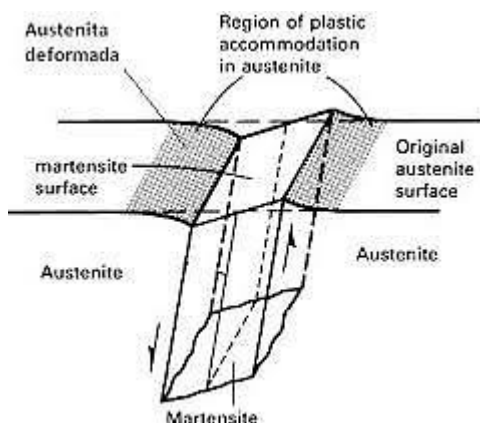


Figura 6. Representació esquemàtica d'una agulla martensítica.

Per minimitzar l'energia de deformació la martensita es forma en plaquetes aproximadament paral·leles, que contenen una alta densitat de dislocacions, i el seu creixement es veu interromput quan es troba un límit de gra d'austenita o altres plaquetes de martensita (figura 7)[8].

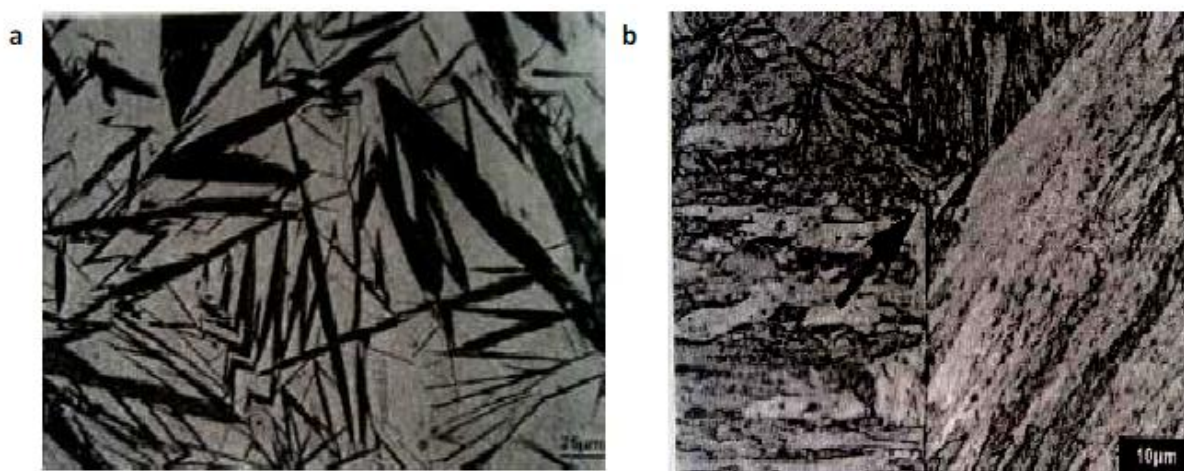


Figura 7. a) Martensita en plaquetes. b) Estructura martensítica en forma de plaques dins els grans d'austenita [8].

La transformació martensítica per deformació plàstica té un efecte important sobre la formació de la martensita, que és bàsicament augmentar les deformacions internes i fer més fàcil la nucleació de la martensita. Degut a això, la martensita es pot formar quan l'acer es deformat plàsticament a temperatures força per sobre de la temperatura M_s . No obstant, la quantitat de martensita formada d'aquesta manera disminueix a mesura que s'eleva la temperatura, i per tant, és força comú designar la temperatura més alta a la qual es pot formar martensita per deformació amb la temperatura M_d [12].

En la figura 8, es mostra les possibilitats per induir la formació de martensita en el cas d'un esforç de tensió.

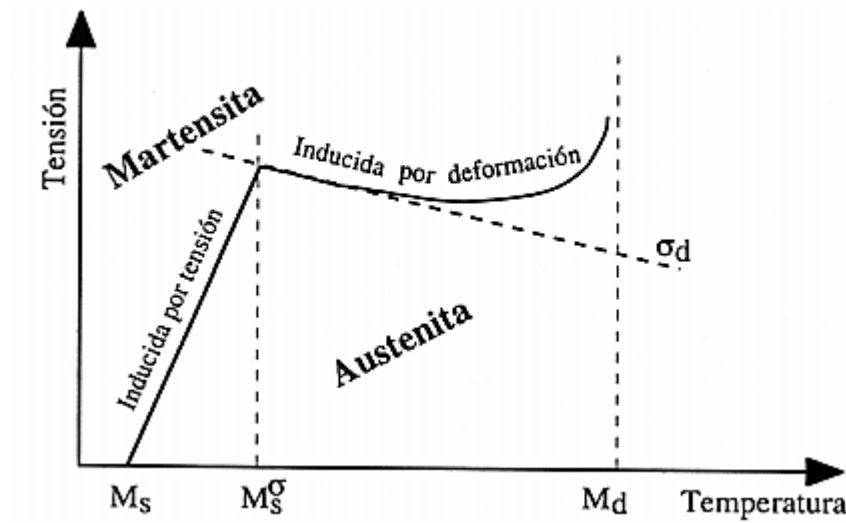


Figura 8. Transformació de martensita en funció de la temperatura i l'esforç extern.

1.4. Tribologia

La tribologia (del grec *tribō*, "fregar o rosar") és la ciència que estudia la fricció, el desgast i la lubricació que tenen lloc durant la interacció entre dues o més superfícies sòlides [13].

La tribologia doncs, és la part de l'enginyeria i de la ciència dels materials que estudia els fenòmens de fricció, lubricació i desgast:

1. La fricció entre dos cossos en moviment.
2. El desgast com efecte natural d'aquest fenomen.
3. La lubricació com un mitjà per reduir el desgast.

Per tal de simular el comportament dels materials en condicions reals s'utilitzen tribòmetres.

1.4.1. Fricció.

La fricció (del llatí *fricare*, "fregar") és la resistència al lliscament d'un cos sobre un altre.

La major part de l'energia perduda per fricció es dissipa en el sistema en forma de calor. Aquest ha de ser eliminat per refredament per disminuir el dany. L'altra part de l'energia es dissiparà per mitjà de deformacions, la qual cosa ens portarà al desgast de les superfícies de contacte, ja que cal tenir en compte que les superfícies de contacte no són completament llises a nivell microscòpic.

La magnitud o nivell de fricció sovint s'expressa en termes de coeficient de fricció μ , que és la relació entre la força de fricció F i la càrrega aplicada N .

El coeficient de fricció depèn de molts paràmetres, com per exemple la neteja de les superfícies de contacte, la zona de contacte, la topografia de les superfícies, la presència o no d'òxid, etc.

1.4.2. Desgast.

El desgast és conegut per l'ésser humà des de que va començar a utilitzar utensilis domèstics a partir d'elements naturals. Aquest fenomen és una de les formes més importants de degradació dels materials, juntament amb la fatiga i la corrosió.

Podem definir el desgast com el dany produït per la pèrdua de material d'una superfície sòlida com a resultat del moviment relatiu d'aquesta respecte a una altra amb la que està en contacte. Aquest fenomen es dona generalment en la superfície dels materials i pot arribar a afectar a la subsuperfície. Per tant,

aquest fenomen causa la pèrdua de material i la subsegüent disminució de les dimensions i per tant la pèrdua de toleràncies de peces i elements mecànics.

Per combatre i prevenir el desgast es solen tenir en conte les següents idees:

- Mantenir baixa la pressió de contacte
- Mantenir baixa la velocitat de lliscament.
- Mantenir llisses les superfícies de rodaments.
- Utilitzar materials durs.
- Assegurar baixos coeficients de fricció.
- Utilitzar lubricants.

El desgast i la erosió eliminen material d'una peça mitjançant un atac mecànic de sòlids o de líquids. La corrosió i les ruptures mecàniques també contribueixen a aquest tipus d'atac. [14]

Existeixen 3 tipus de desgast que explicarem a continuació: *Desgast adhesiu, desgast abrasiu i desgast per fatiga.*

1.4.3. Desgast per adhesió.

El desgast per adhesió també conegut com ratllat o raspat, succeeix quan dos superfícies sòlides llisquen una sobre l'altra sota pressió. Les projeccions superficials es deformen plàsticament i finalment arriben a soldar-se degut a les altes pressions locals. De forma que continua el desplaçament, aquestes unions es trenquen produint cavitats en una superfície, projeccions en l'altra i, freqüentment, partícules abrasives minúscules, tot això contribueix a un major desgast de les superfícies [14].

Podem considerar diversos factors de cara a millorar la resistència al desgast dels materials. A banda del disseny dels components, també són força importants les propietats i la microestructura del material, ja que normalment si ambdues superfícies són d'alta duresa, el desgast serà petit. També són beneficiosos una alta resistència mecànica, per resistir les càrregues aplicades, i a més a més una alta tenacitat i ductilitat per impedir l'esquinçament del material de la superfície [14].

1.4.4. Desgast abrasiu.

Aquest tipus de desgast es dona quan s'elimina material d'una superfície degut al contacte amb partícules dures. Aquestes partícules poden existir en la superfície d'un segon material o poden estar lliures entre ambdues superfícies (figura 10). També es pot produir quan, sense intenció, s'introdueixen partícules dures en

parts de la maquinària en moviment. El desgast abrasiu s'utilitza en operacions de rectificat per eliminar material intencionalment.

Els materials que millor poden suportar el desgast abrasiu són els que tenen alta duresa, bona tenacitat i alta resistència a la fluència.

- **Dos cossos:** Les irregularitats de la superfície més dura penetren en la de la més tova.

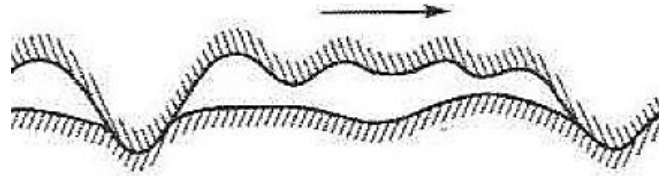


Figura 9. Desgast abrasiu de 2 cossos.

- **Tres cossos:** Intervenien partícules lliures abrasives que es troben entre les dues superfícies i que són suficientment dures per desgastar una de les superfícies o ambdues.

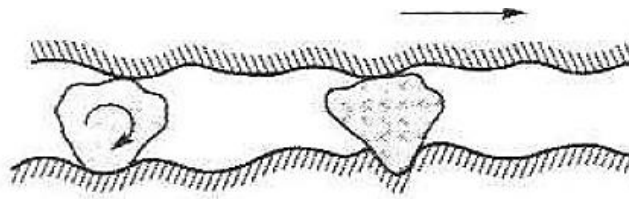


Figura 10. Desgast abrasiu de 3 cossos.

1.4.5. Desgast per fatiga.

El desgast per fatiga apareix quan les superfícies estan sotmeses a cicles de càrrega i descàrrega. Aquest tipus de desgast provoca la ruptura de la superfície en grans fragments deixant forats considerables en aquesta.

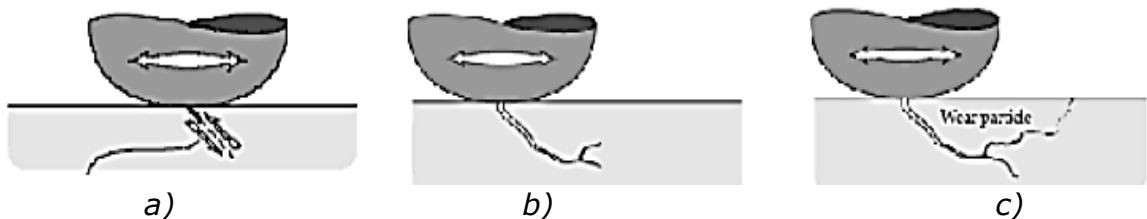


Figura 11. Desgast per fatiga. a) Iniciació per fatiga d'una esquerda. b) Propagació i iniciació d'una segona esquerda. c) Formació d'una partícula de desgast.

1.4.6. Desgast per corrosió.

En aquest cas el deteriorament de l'element metàl·lic es produeix a causa de l'actuació conjunta de factors de tipus mecànic i de corrosió electroquímica. Quan això passa, és a dir, la corrosió i el desgast actuen simultàniament, es produeix una acceleració de la pèrdua de material.

D'altra banda les reaccions químiques en la superfície poden disminuir el desgast per abrasió, ja que si el material es corroeix durant el lliscament la formació d'una pel·lícula lubricant pot disminuir la formació de corrosió i de desgast.

No obstant, el procés de desgast corrosiu en materials que formen capes passives es pot accelerar quan aquesta capa és dèbil, com és el cas d'alguns acers inoxidable austenítics, ja que l'abrasió pot accelerar la corrosió eliminant les partícules protectores.

1.4.7. Desgast en acers inoxidable austenítics.

En aquest capítol s'ha parlat de l'alta resistència a la corrosió dels acers inoxidable austenítics combinada amb les bones propietats mecàniques que aquests ofereixen. No obstant, no s'ha explicat com influeix el desgast en aquests tipus d'acers, ja que no ha estat fins aquesta última dècada que s'han desenvolupat diferents estudis pel que fa a l'anàlisi del desgast en els acers inoxidable austenítics, els quals tot seguit s'enumeraran i s'explicaran cronològicament.

En el primer estudi de G. Bregliozzi et al., l'any 2003, s'estudia l'efecte de la mida de gra en el desgast de l'acer AISI 304, el qual s'investiga com una funció de la humitat atmosfèrica, i s'observa que la disminució de la humitat relativa produeix un augment de la pèrdua de pes i del coeficient de fricció en els assajos de desgast. A més a més, també s'arriba a la conclusió que l'acer amb la mida de gra més gran té més pèrdua de pes que els acers amb grans més fins i que en aquests la pèrdua de pes en el cas d'un augment de la humitat és també menys pronunciada [19].

Els mateixos G. Bregliozzi et al., a l'any 2005, van estudiar el comportament de l'erosió per cavitació de l'acer AISI 304 enfront de l'acer amb alt contingut de nitrogen (HN), amb diferents mides de gra, en aigua amb diferents valors de pH i a temperatura ambient. Van observar que la resistència a l'erosió per cavitació augmentava a mesura que es disminuïa la mida de gra. A més, van poder constatar que la resistència al desgast per cavitació és perceptible a les variacions en el pH, ja que la disminució d'aquest valor produeix un augment dels danys en la superfície. Finalment, van concloure que l'acer HN mostrava millor resistència a l'erosió per cavitació que l'acer AISI 304, i van observar que les propietats mecàniques com la duresa, la resistència a la tracció, la resistència a la fluència i la mida de gra d'ambdós acers influïa de manera important en la resistència a l'erosió per cavitació (Re) [20].

L'any 2006, M. Reza Bateni et al., van estudiar el comportament del desgast en l'acer inoxidable AISI 304 i l'acer al carboni AISI 1045. En aquest cas es van analitzar els canvis del comportament tribològic, l'eixamplament dels pics de raig X, i la microestructura dels dos tipus d'acer sota l'efecte del desgast i la corrosió simultània. Emprant les mesures de difracció de raig X van demostrar que amb un augment de la càrrega aplicada, les superfícies desgastades de l'acer al carboni (AISI 1045) assolien una tensió constant en que es produïa la fractura i el desgast. Per contra, en l'acer inoxidable (AISI 304) quan la càrrega s'augmentava, la intensitat dels pics de difracció de raig X disminuïa. Per últim, es va observar que en els dos tipus d'acer la presència d'un ambient corrosiu produïa una pèrdua menor de pes i un coeficient de fricció menor [21].

L'any 2007 es van realitzar diversos estudis, el primer dels quals per Young-Suk Kim et al., que van estudiar l'efecte de la transformació de fase en el desgast de l'acer inoxidable austenític d'alt contingut de nitrogen (HNS) 18Cr-18Mn-2Mo-0,9N. Aquest estudi va consistir en analitzar el desgast en sec i a temperatura ambient que sofria l'acer aplicant-hi un seguit de càrregues amb unes boles d'acer a velocitat constant. La investigació es va realitzar per el mateix acer en dos condicions diferents de tractament tèrmic. En el primer cas es va escalfar l'acer a 1050°C durant 30 minuts seguit d'un refredament brusc amb aigua, i després d'assajar aquest acer es va observar que fins a 5N de càrrega gairebé no hi havia desgast i a partir de 5N aquest augmentava bruscament. En el segon cas, l'acer es va escalfar fins a 900°C durant 27,7 hores en una atmosfera d'argó i posteriorment es va refredar en aigua bruscament, i després d'assajar-lo es va observar que en aquest cas el desgast augmentava gradualment segons augmentava la càrrega. Finalment, les seccions transversals de les superfícies desgastades i les partícules de desgast de l'acer es van analitzar amb escaneig de microscòpia electrònica de transmissió (STEM) i per difracció de raig-X i es va observar que aquest increment del desgast estava relacionat amb la transformació de fase martensítica induïda per deformació [22].

El mateix any 2007, Morteza Zandrahimi et al. van realitzar un estudi sobre la formació de martensita durant el desgast de l'acer inoxidable AISI 304. Per a realitzar els assajos de desgast es va emprar un tribòmetre "pin-on-disk" i amb la microscòpia electrònica de rastreig (SEM) i l'anàlisi de difracció de raig X es van estudiar els canvis estructurals que es produeixen durant el procés de desgast. L'estudi de les superfícies desgastades va mostrar que les condicions de desgast i la càrrega aplicada influeixen en la intensitat dels pics de martensita en el patró de raig X. Per altra banda, l'augment de temperatura en la zona de contacte i la baixa conductivitat tèrmica de l'acer inoxidable AISI 304 són responsables de l'acumulació de calor i per tant d'un alleujament de la tensió que pot disminuir els valors de microduresa [23].

També al 2007, M.C.M. Farias et. al, van realitzar un estudi sobre la influència de la càrrega aplicada, la velocitat de lliscament i la transformació martensítica en el desgast en sec dels acers inoxidables austenítics AISI 304 i AISI 316. Els assajos de desgast es van realitzar amb un tribòmetre "pin-on-disc" i les superfícies desgastades i les partícules de desgast es van analitzar mitjançant microscòpia

electrònica de rastreig (SEM) i difracció de raig X. Es va observar que la taxa de desgast depenia de la interacció entre la càrrega aplicada i la velocitat tangencial i per l'estabilitat de l'austenita. Quan la càrrega era moderada es va poder observar mecanismes de desgast mixt i l'oxidació de les partícules metàl·liques, en canvi en condicions de càrregues severes el desgast era majoritàriament adhesiu. D'altra banda, van constatar que la taxa de desgast era més alta en l'acer inoxidable AISI 304 que en l'acer AISI 316, en canvi, el coeficient d'interacció entre la càrrega i la velocitat tangencial va ser més significativa en aquest últim. Per últim, van descobrir que la velocitat tangencial tenia l'efecte més fort sobre la velocitat de desgast en comparació amb l'efecte de la càrrega. A més, es va detectar que la transformació martensítica induïda per deformació s'observava en la superfície de lliscament dels acers inoxidable austenítics [24].

L'any 2008, Meng Hua et al., van estudiar el desgast i la fricció que mostrava l'acer inoxidable austenític SUS 304 al ser assajat contra una esfera ceràmica (Al_2O_3) sota una càrrega relativa alta, mitjançant un assaig tribològic "pin-on-disk". Els resultats van mostrar que hi ha un període de gestació abans que el coeficient de fricció augmenti ràpidament a mesura que la càrrega normal s'incrementa. Per altra banda, van demostrar que la taxa de desgast de l'acer SUS 304 disminueix amb l'augment de la velocitat de lliscament. En conclusió, el desgast en l'acer es va analitzar com la barreja de dos processos, la ruptura de partícules de ceràmica i/o la transformació d'austenita metastable a martensita [25].

L'any 2012, Myung Chul Park et al., van estudiar l'efecte de la transformació martensítica causada per una tensió induïda, en la resistència a l'erosió per cavitació i el temps d'incubació d'aliatges de Fe-10Cr-10Ni-XC (per $x=0,3$; $0,4$; i $0,60$ de % de pes). Van observar que a mesura que augmentava aquest percentatge de carboni la pèrdua de pes en els aliatges també augmentava, mentre que el període d'incubació i la quantitat de martensita transformada disminuïa. Per altra banda, la fracció de volum de martensita es va incrementar amb l'augment del temps de prova fins arribar a un punt de saturació per a cada aliatge que es va assajar i a partir d'aquest punt de saturació el volum de martensita no va canviar tot i que la fase de martensita transformada es va eliminar. Aquest resultat indica que les noves fases de martensita es van formar independentment després de l'eliminació de la martensita formada prèviament. En conclusió, van observar que la transformació martensítica exerceix efectes significatius sobre la resistència al desgast i la millora de la resistència a l'erosió per cavitació ja que l'energia de cavitació es absorbeix durant la transformació de la fase austenítica a la fase martensítica en cada aliatge [26].

Durant el 2013, N. L. Parthasarathi et al., van observar l'efecte de la temperatura sobre el desgast per lliscament de l'acer inoxidable AISI 316 L (N) i la rugositat de la superfície de les petjades que provoca aquest desgast. En aquest estudi es van realitzar un seguit d'experiments de desgast del tipus "pin-on-disk" a càrrega constant de 20N i a velocitat de lliscament constant de $0,8$ m/s, però variant la temperatura fins als 550°C . Després d'analitzar els resultats, van observar que el desgast augmentava considerablement quan incrementava

la temperatura. D'altra banda, emprant un perfilòmetre en els assajos realitzats a diferents temperatures van poder constatar que a l'augmentar la temperatura la pèrdua de material es presentava amb més ondulacions que comportaven valors més alts de rugositat superficial [27].

Per últim, també l'any 2013, I. Mejía et al., van estudiar el desgast dels acers austenítics d'alt contingut de Mn (TWIP), tot comparant-los amb un microaliatge amb Nb. Per observar el comportament del desgast, van avaluar-lo en condicions de lliscament en sec pel mètode "pin-on-ring", durant 10 kilòmetres i variant la càrrega i la velocitat de lliscament. Durant els assajos, van controlar el coeficient de fricció i van estudiar la resistència del desgast a partir de la taxa de desgast. Analitzant els resultats van observar que els acers TWIP presentaven un baix coeficient de fricció i que el desgast augmenta la resistència al incrementar la velocitat de lliscament, fet que van atribuir a la formació d'una capa d'òxid. Finalment, van observar que l'addició de Nb en l'acer TWIP millorava lleugerament la resistència al desgast [28].

CAPÍTOL 2:

PROCEDIMENT

EXPERIMENTAL

2.1. Material estudiat

El material estudiat és l'acer austenític metastable EN 1.4318 (AISI 301LN), subministrat en quatre condicions diferents de recuit i de deformació en fred, que són conegudes comercialment com 2B, C850, C1050 i C1250. Per facilitar l'estudi s'ha establert en la memòria una nomenclatura per a cada tipus (taula 3).

Taula 4. *Acers austenítics inoxidables metastables estudiats.*

Tipus d'acer	Designació comercial	Nomenclatura	Condicció
EN 1.4318	2B	O	Recuit
	C850	J	Deformació en fred 10%
	C1050	K	Deformació en fred 20%
	C1250	L	Deformació en fred 40%

L'acer ha estat subministrat per l'empresa belga OCAS NV, *Arcelor-Mittal R&D Industry Gent*, en forma de xapa d'1,5 mm d'espessor. Per tal d'obtenir les mostres s'ha tallat la xapa en forma de quadrats de dimensions 10x10 mm.

2.1.1. Composició química.

Com s'observa en la taula 5, la composició química en % en pes d'aquest acer el classifica com un acer inoxidable austenític:

Taula 5. Composició química de l'acer estudiat (%) [29].

C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	N
0,015	17,36	7,18	0,55	1,68	0,23	0,1

2.1.2. Microestructura.

L'acer recuit (O) té una microestructura inicial d'austenita amb percentatges de martensita no superiors al 3%. Els grans austenítics tenen una estructura cristal·logràfica FCC (Fe- γ) i una mida de gra de $11.66 \pm 4,35 \mu\text{m}$ (figura 12) [30].

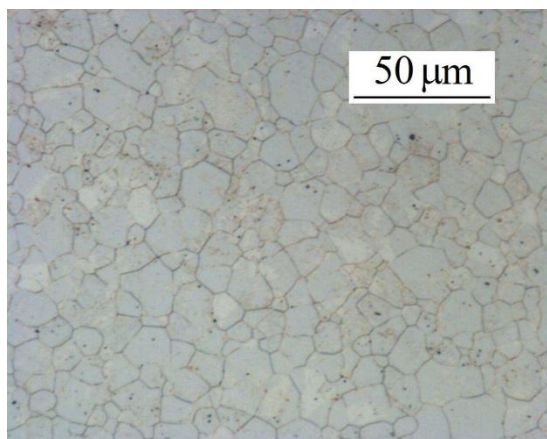


Figura 12a. Fase Austenítica de l'acer recuit 2B (O) [30].

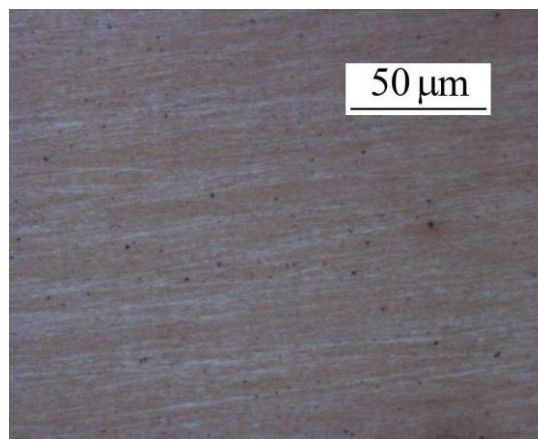


Figura 12b. Fase Martensítica ($\alpha' < 3\%$) de l'acer recuit 2B (O) [30].

L'acer deformat en fred (J) presenta un percentatge de martensita d'entre el 8 i el 10%. Els grans austenítics tenen una mida de gra de $8.55 \pm 3,74 \mu\text{m}$ (figura 13) [30].

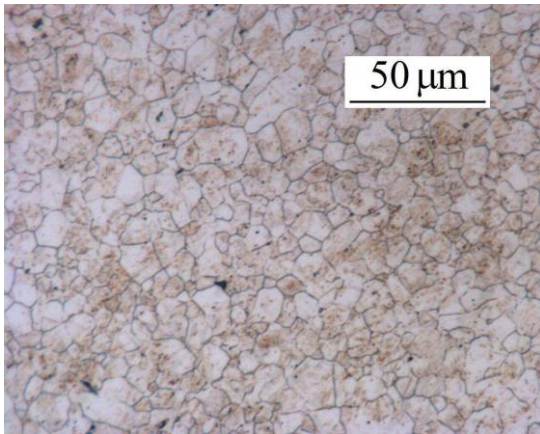


Figura 13a. Fase Austenítica de l'acer laminat en fred C850 (J) [30].

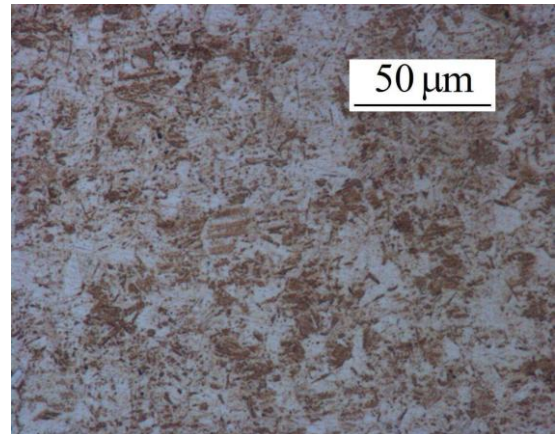


Figura 13b. Fase Martensítica (8-10% α') de l'acer laminat en fred C850 (J) [30].

D'altra banda, l'acer laminat en fred (K), presenta un percentatge de martensita del 28%. Els grans de la fase austenítica tenen una mida de $9.05 \pm 4,21 \mu\text{m}$ (figura 14) [30].

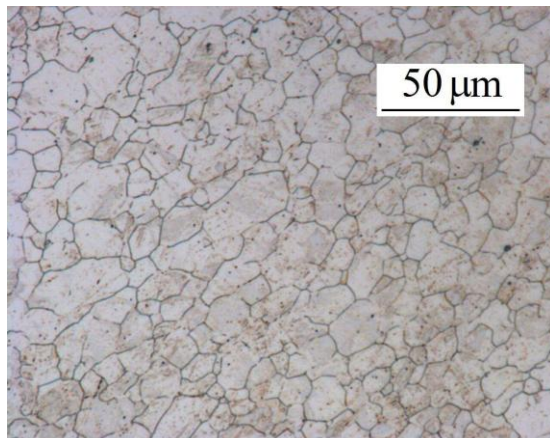


Figura 14a. Fase Austenítica de l'acer laminat en fred C1050 (K) [30].

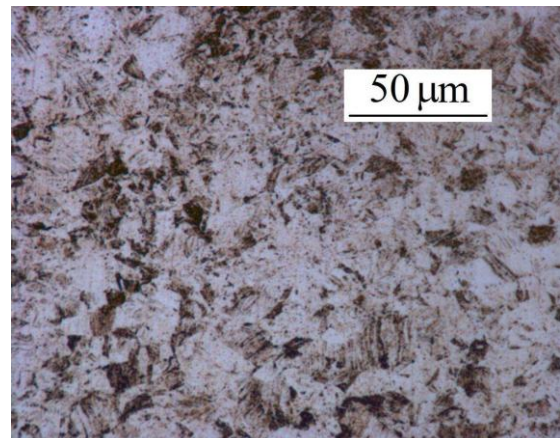


Figura 14b. Fase Martensítica (28% α') de l'acer laminat en fred C1050 (K) [30].

Per últim, l'acer laminat en fred (L), presenta percentatges de martensita del 38%. Cal indicar que en tots els casos l'estructura cristal·logràfica de la martensita és BCC (Fe- α') i no s'observa la presència de martensita- ϵ . Els grans austenítics que estan lleugerament orientats en la direcció de laminació (figura 15), tenen una mida de $9,24 \pm 4,19 \mu\text{m}$ [30].

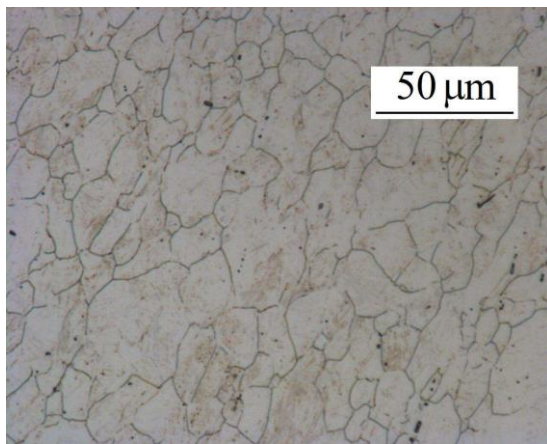


Figura 15a. Fase Austenítica de l'acer laminat en fred C1250 (L) [30].

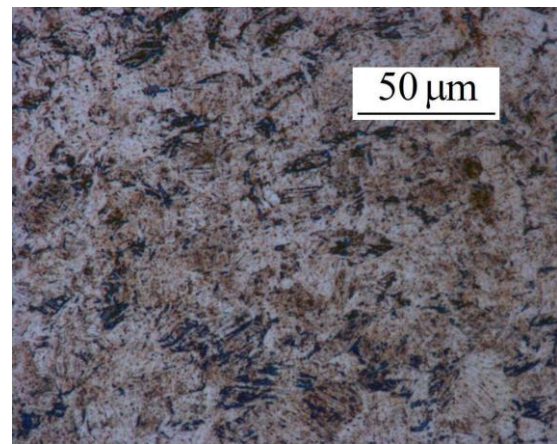


Figura 15b. Fase Martensítica (38% α') de l'acer laminat en fred C1250 (L) [30].

2.1.3. Propietats físiques.

L'acer inoxidable EN 1.4318 (AISI 301LN) en estat de recuit no és magnètic, però un cop deformat en fred (J, K i L) aquest acer es torna magnètic a causa de la transformació martensítica que ha sofert. Les propietats físiques de l'acer inoxidable austenític metastable 301LN es poden observar en la taula 6:

Taula 6. Propietats físiques de l'EN 1.4318 [4].

Densitat [Kg/dm ³]	Mòdul de Young [GPa]	Coefficient d'expansió tèrmica [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	Conductivitat Tèrmica [W/(m·K)]	Calor específic [J/(kg·K)]	Resistivitat elèctrica [(Ω·mm ²)/m]
7,844	200	16,5 - 17,5	15	500	0,73

2.1.4. Propietats mecàniques.

Les propietats mecàniques de l'acer EN 1.4318 es veuen significativament influenciades per la deformació en fred i la conseqüent transformació martensítica ja que l'acer mostra major resistència a la tracció i un increment de la duresa i per contra la disminució de la ductilitat (taula 7). [30]

Taula 7. Propietats mecàniques de l'EN 1.4318 [30].

Tipus d'acer	Límit elàstic [MPa]	Resistència a la tracció [MPa]	Allargament [%]	Duresa HV10
Acer recuit	360	902	60	240
Acer laminat (C850)	650	967	38	300
Acer laminat (C1050)	926	1113	25	400
Acer laminat (C1250)	1148	1173	20	436

2.2. Metodologia

Els passos que s'ha seguit per a cada una de les mostres són els que es descriuen a continuació:

1. Tallar les mostres amb la ciselladora, marcar-les, netejar-les en bany d'ultrasons, pesar-les i mesurar-ne la rugositat tal com s'indica en l'apartat 2.3.
2. Mitjançant adhesiu s'ha fixat la mostra al portamostres.
3. Dur a terme l'assaig de desgast emprant el tribòmetre tal i com s'indica més endavant en l'apartat 2.5.1.
4. Netejar i desencastar la mostra del portamostres en un bany d'ultrasons.
5. Pesar altra vegada la mostra per observar-ne el pes perdut durant l'assaig.
6. Mesurar el perfil de la petjada mitjançant el rugosímetre, així com s'indica en més endavant.
7. Mesurar la distància real de cada una de les petjades amb un peu de rei.

8. Fotografiar les petjades utilitzant el microscopi òptic de rastreig (SEM) per observar els mecanismes de desgast i saber la composició química.
9. Determinar el percentatge de martensita emprant la difracció de Raig-X, tal i com s'indica en l'apartat 2.4.5.
10. Encastar les mostres en baquelita.
11. Tallar la mostra encastada en direcció perpendicular a la petjada de manera que aquesta quedi dividida en dos parts aproximadament iguals.
12. Realitzar microindentacions mitjançant el microduròmetre.
13. Fotografiar les microindentacions emprant la microscòpia òptica per tal de mesurar la distància entre la superfície i cadascuna de les microindentacions.

2.3. Preparació de les mostres

Un cop tallades les mostres i abans de realitzar els assajos cal marcar les mostres per tal de tenir un control exhaustiu en tot moment. Després cal netejar-les per eliminar les impureses que puguin tenir i finalment pesar-les.

Les mostres s'han marcat amb un marcador amb punta de metall dur (Co-WC) com el de la figura 16. Per tal de diferenciar les mostres de diferents tipus d'acer, aquestes s'han marcat segons la nomenclatura que s'ha establert anteriorment: O (2B), J(850), K(1050) o L(1250) i el número de mostra, tal i com mostra la figura 17.



Figura 16. Marcador amb punta de metall dur.



Figura 17. Exemple de les mostres marcades 01, J5, K5 i L10.

Per la neteja de les mostres s'ha utilitzat una màquina d'ultrasons Selecta (figura 18). Per tal d'assegurar una correcta neteja s'han submergit les mostres en un recipient amb acetona i a continuació es col·loca aquest durant 15 minuts en la màquina d'ultrasons de tal manera que s'eliminin totes les impureses de la superfície de la mostra. Aquest procés s'ha realitzat abans i després de cada assaig, i en els casos oportuns just abans de porta les mostres a SEM i al perfilòmetre.



Figura 18. Màquina d'ultrasons.

Per finalitzar el procés de preparació de mostres s'han pesat tres vegades mitjançant una balança de precisió (± 0.0001 g) com la que es mostra en la figura 19. Aquest procés s'ha realitzat abans i després de cada assaig per tal de saber la quantitat de material que s'ha desgastat. D'altra banda, també s'ha utilitzat la balança per tal de determinar la densitat del material.



Figura 19. Balança de precisió.

Per tal d'avaluar la duresa en la superfície de la petjada de desgast s'han tallat algunes mostres transversalment, és a dir, perpendicularment a la petjada i a continuació s'han realitzat un conjunt de microindentacions. Per tal de treballar en bones condicions, prèviament, s'han encastat amb baquelita dura (figura 20) de la marca *DuroFast Struers* un conjunt de mostres assajades que s'han seleccionat. La màquina d'encastar mostres que s'ha utilitzat és la *LaboPress-3* de la marca *Struers*, com la de la figura 21.

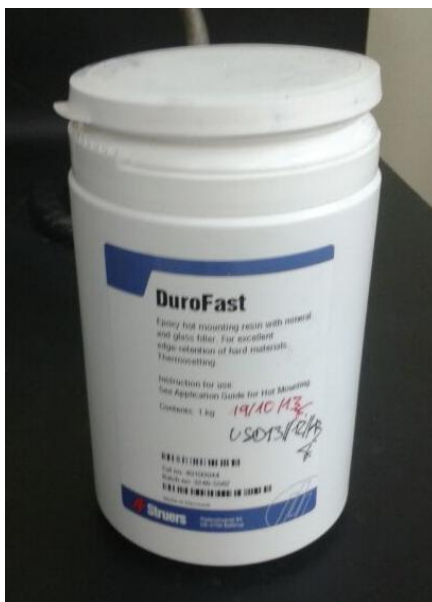


Figura 20. Baquelita emprada.



Figura 21. Màquina d'encastar mostres.

Un cop s'han encastat les mostres, s'ha utilitzat un equip que permet tallar amb precisió les mostres amb un disc de diamant que gira a 5000rpm i amb una velocitat d'avanc de 0,015 mm/s. L'aparell de tall que s'ha emprat és l'Accutom-50 de la marca Struers com la que es mostra en la figura 22. Un cop tallades les mostres (figura 23) s'han polit suaument amb un paper de desbast amb partícules de 10 μm .



Figura 22. Talladora Accutom-50.



Figura 23. *Mostra encastada i tallada.*

2.4. Caracterització de la superfície

2.4.1. Rugositat

La rugositat superficial és un concepte que s'utilitza per definir l'estat d'irregularitat de la superfície d'un material, on es troben valls i pics d'amplitud variable. Els mètodes més emprats per quantificar aquesta magnitud es basa en el registre de perfils d'altures mitjançant un rugosímetre o un perfilòmetre [31]. El rugosímetre que s'ha utilitzat en aquest cas és el *Surfest SV-500* de Mitutoyo com el que s'observa en la figura 24.



Figura 24. Rugosímetre Surfest SV-500 de Mitutoyo.

El mecanisme que utilitza el rugosímetre és simple, ja que consta d'una fina punta de diamant en contacte amb la superfície que es vol analitzar, la qual realitza un rastreig a velocitat constant i en línia recta. Les variacions d'altura que provoca la irregularitat de la superfície es converteixen en senyals elèctriques que es registren a partir del programa *Surfpack* que permet visualitzar aquests pics i valls com un perfil lineal (2D) [31].

Els paràmetres de rugositat més emprats en enginyeria són:

- **R_a** és el promig aritmètic dels valors absoluts de les altures $y(x)$ mesurades a partir de la línia central.
- **R_q** és el promig de les desviacions quadràtiques respecte a l'altura mitja.
- **R_y** és la diferència màxima d'altures en la longitud de mostreig. És a dir, entre l'altura màxima d'un pic i la profunditat màxima d'una vall.

- R_z és la distància promig entre els cinc pics més altes i les cinc valls més profundes en la longitud de mostreig. [31]

Durant la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat el rugosímetre per a dos finalitats diferents. Primerament, abans d'assajar les mostres s'han mesurat els valors de rugositat per tal de garantir que la rugositat promig (R_a) fos inferior a $0,7 \mu\text{m}$, com s'indica en la norma ASTM G99-04 d'assaigs de pin sobre disc.

Per últim, després de cada assaig i un cop netes i pesades les mostres, s'ha mesurat el perfil de la petjada de desgast que posteriorment s'utilitzaran per calcular el volum de desgast de material.

Els passos que s'han seguit per mesurar la rugositat de les mostres en ambdós casos són els següents:

1. Encendre el rugosímetre i executar en l'ordinador el programa *Surfpack*.
2. Col·locar la mostra damunt el porta mostres de manera que la punta del rugosímetre quedi just damunt la mostra sense arribar a tocar-la.
3. Dipositar la punta del rugosímetre suaument damunt la mostra fins que aquesta entri en contacte amb la mostra.
4. Calibrar el palpador del rugosímetre amb l'ajuda de les tres barres que apareixen en pantalla en el programa *Surfpack*, les quals s'observen en la figura 25.

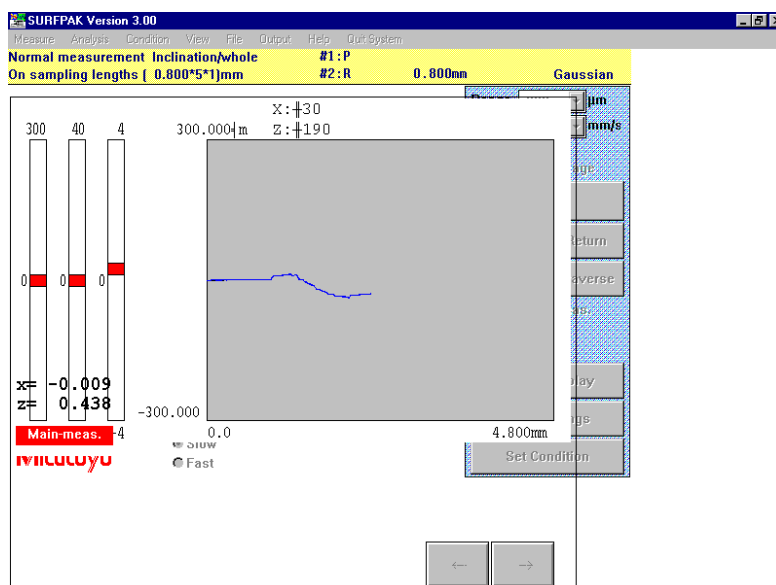


Figura 25. Programa *Surfpack*: Calibració del Palpador

5. Introduir els paràmetres de mesura segons indica el manual de funcionament del rugosímetre.

- Realitzar un mínim de tres mesures per obtenir uns resultats més ajustats (figura 26).

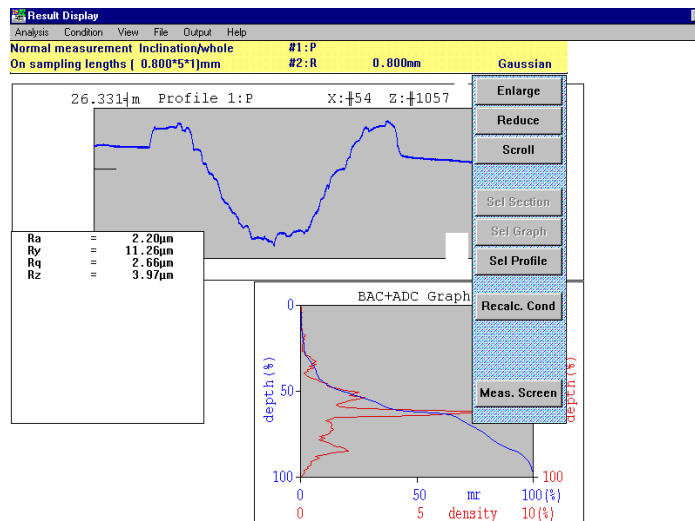


Figura 26. Programa Surfpack: Perfil de rugositat i paràmetres de rugositat

- Guardar els resultats amb el format d'arxius de text per tal de poder-los analitzar posteriorment amb el programa de tractament de dades *Origin*.

2.4.2. Perfilòmetre o Microscòpia Mecànica de rastreig

El perfilòmetre o *Microscòpia Mecànica de rastreig* a diferència del rugosímetre permet construir imatges en 3 dimensions mitjançant una successió de passades com la que realitza el rugosímetre. No obstant, cal precisar que un paràmetre molt important a tenir en compte és la forma i el radi de la punta de palpador ja que influeix enormement en la resolució de les mesures tant laterals com verticals. Així doncs, normalment s'utilitzen puntes amb radis de 2 µm que permeten mesurar les valls que amb puntes amb radi superior no es podrien mesurar [31].

El perfilòmetre que s'ha utilitzat en aquest cas és el *Dektak 150 Surface Profiler* de la marca Veeco com el que s'observa en la figura 27. Aquest perfilòmetre utilitza una punta de diamant (stylus) de forma L, que es l'estàndard acceptat per les mesures de topografia de la superfície, rugositat i mida de pas. En la seva configuració estàndard, la força de la punta (stylus) es pot ajustar des de 1 mg fins a 15 mg, que permet adaptar-se a superfícies dures i toves. A més, aquest aparell està equipat amb una auto etapa de 150 mil·límetres X-Y de mapatge 3D [32].

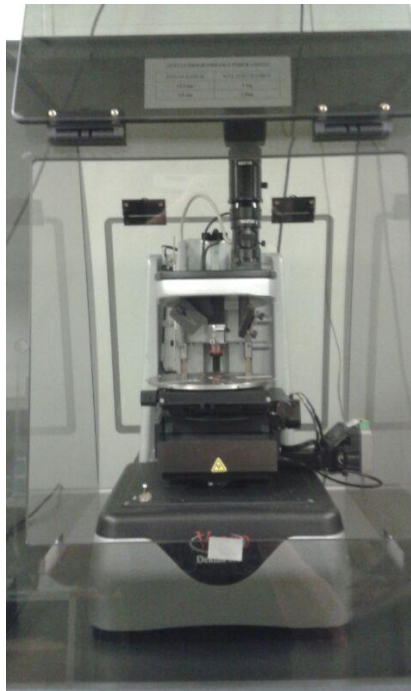


Figura 27. *Perfilòmetre Dektak 150.*

El Dektak 150 ens permet obtenir la topografia de la petjada de desgast i els perfils longitudinals i transversals d'aquesta, a partir del programa *Vision*.

2.4.3. Microscopi òptic confocal

El microscopi òptic confocal és un instrument que, complementat per mètodes electrònics i de computació, permet enfocar únicament plans determinats de la mostra, eliminant la llum procedent de zones que no estan en el pla d'enfocament [33].

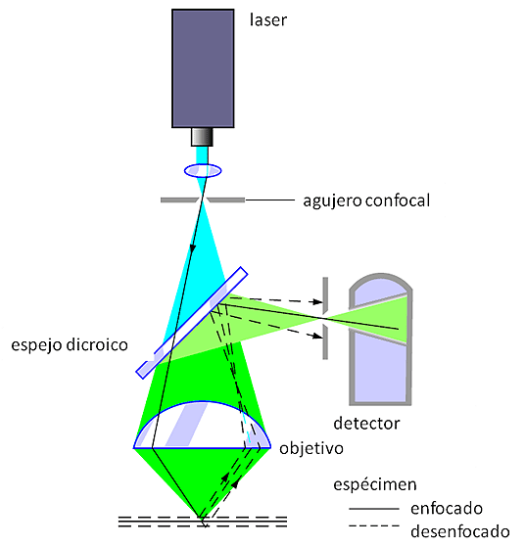


Figura 28. Esquema del principi de funcionament d'un microscopi confocal [33].

Així doncs, la microscòpia confocal permet realitzar talls òptics fins a mostres més o menys gruixudes i realitzar reconstruccions de 3 dimensions a partir de talls seriatos. Per a obtenir la informació completa, el raig làser ha de ser desplaçat per tota la superfície de la mostra, a aquest procés se'l coneix com escaneig o rastreig. El microscopi òptic confocal utilitzat en aquest projecte ha estat l'*Olympus Lext*. (figura 29) [33].



Figura 29. Microscopi òptic confocal Olympus Lext.

2.4.4. Microscopi òptic de rastreig (SEM)

Per analitzar quins poden ser els possibles mecanismes de desgast s'utilitza el microscopi electrònic de rastreig que és un mètode per obtenir imatges d'alta resolució de superfícies.

El SEM (*Scanning electron microscope*) o microscopi òptic de rastreig és considerat la millor i més convenient eina per detectar mecanismes de fractura en la superfície [34]. Aquest instrument utilitza electrons per la formació d'imatges de igual forma que un microscopi òptic utilitza la llum visible. L'avantatge sobre la microscòpia òptica és que el SEM obté molts més augments i una major profunditat de camp de fins a 100 vegades la microscòpia òptica. A més a més, realitza un anàlisi químic tan qualitatiu com quantitatiu [35].

El seu funcionament es basa en l'aplicació d'un feix d'electrons sobre la mostra l'energia dels quals està entre 100eV fins a 30 keV, depenent de l'objectiu de l'anàlisi (figura 30). Les mostres han de ser conductores i que el sistema estigui en alt buit per tal d'impedir la divergència del feix d'electrons que provocaria la degradació de la imatge [35].

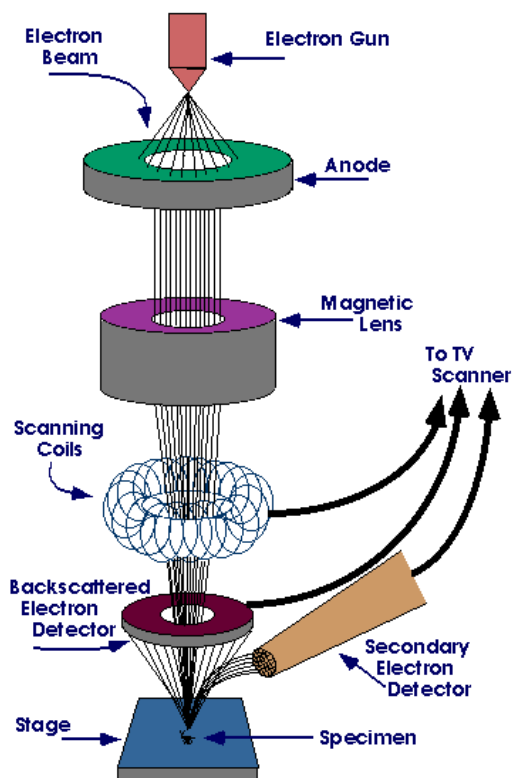


Figura 30. Esquema funcionament del SEM.

El microscopi electrònic de rastreig que s'ha utilitzat en aquest projecte és un *JSM-6400 Scanning microscope* de JEOL com el que s'observa en la figura 31,

amb una resolució d'1,5 nm, un factor d'ampliació de 10-300.000 vegades i una energia del feix d'electrons de 0,2-40 keV.



Figura 31. *Microscopi electrònic de rastreig JSM-6400 Scanning microscope de JEOL.*

2.4.5. Difracció de Raig-X

La difracció de rajos X és el fenomen físic que es produeix al interactuar un feix de rajos X, d'una determinada longitud d'ona, amb una substància cristal·lina. Aquest fenomen aplicat en una mostra policristal·lina ens permet identificar les fases cristal·lines tant en l'aspecte qualitatiu com quantitatiu, ja que tots els sòlids cristal·lins posseeixen el seu patró de difracció [36].

L'equip utilitzat és el *Bruker D8 Advance* com el que s'observa en la figura 32.



Figura 32. *Equip de difracció de raig-X Bruker D8 Advance.*

Per determinar únicament el percentatge de martensita en la petjada que es forma després de l'assaig de desgast, cal cobrir amb cinta adhesiva la part restant de la mostra a analitzar, així deixant visible únicament la petjada de desgast.

La **lley de brag** (equació 4) ens permet predir la direcció en la que es produeix la interferència constructiva entre feixos de rajos X dispersats coherentment per un cristall [36]:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (4)$$

On:

n és un nombre enter.

λ és la longitud d'ona dels raigs X.

d és la distància entre plans de la xarxa cristal·lina.

θ és l'angle entre els raigs i els plans de dispersió.

S'han utilitzat les equacions 5 i 6 per determinar les fraccions màssiques de l'austenita i martensita després del procés de desgast a partir dels valors obtinguts dels pics característics de martensita i austenita de la figura 34.

$$\frac{X_Y}{X_{\alpha'}} = \frac{RIR_Y}{RIR_{\alpha'}} \cdot \frac{I_{\alpha'} \text{ observada}}{I_Y \text{ observada}} \cdot \frac{I_Y \text{ referència}}{I_{\alpha'} \text{ referència}} \quad (5)$$

$$X_Y = \frac{100}{1 + \frac{X_{\alpha'}}{X_Y}} \quad (6)$$

On:

$X_{\alpha'}$ = Fracció màssica de martensita- α' .

X_Y = Fracció màssica d'austenita- γ .

RIR_Y = Rati d'intensitat de referència per austenita- γ .

$RIR_{\alpha'}$ = Rati d'intensitat de referència per austenita- α' .

I_Y = Intensitat observada d'austenita- γ .

$I_{\alpha'}$ = Intesitat observada de martensita- α' .

S'ha utilitzat el programa *Origin* per tal de calcular els pics característics obtinguts de l'espectre de difracció com s'observa en la figura 33; i a continuació el programa *Excel* per calcular els percentatges màssics d'austenita i martensita (figura 34)

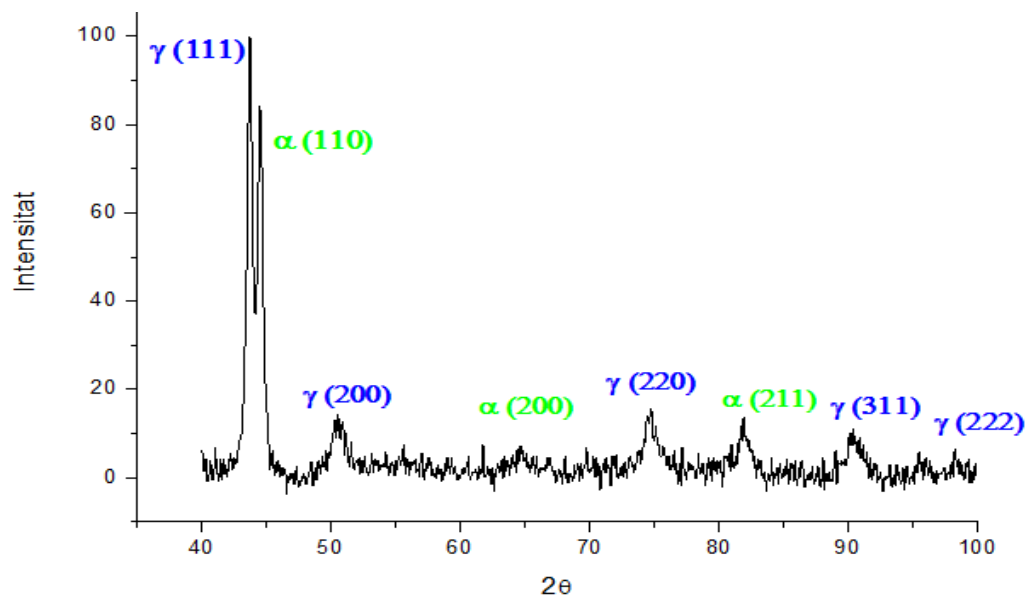


Figura 33. Exemple del gràfic obtingut per difracció de raig-X, amb els pics característics de fase austenítica (γ) i martensítica (α').

[illegible]

Figura 34. Exemple de fulla d'Excel per la mostra J2.

2.4.6. Temperatura superficial

Per tal de determinar les variacions de la temperatura durant l'assaig de desgast, s'ha emprat un termòmetre d'infraroig *PCE-890* de la marca *Iberica*, un aparell que permet realitzar mesures de temperatura superficials sense contacte. La bona relació entre la distància i el punt de mesura de 50:1 permet mesurar objectes molt petits a grans distàncies (figura 35).

Aquest experiment s'ha realitzat durant un assaig a 10 N, de manera que cada cert temps (cada cop un interval de distància major) s'aturava l'assaig per mesurar la temperatura superficial de la petjada de desgast. Així, la primera mesura es va fer aturant el tribòmetre a 20 metres, la segona després de reiniciar-lo fins a 40 metres, la tercera durant 60 metres i així successivament fins a 500 m.

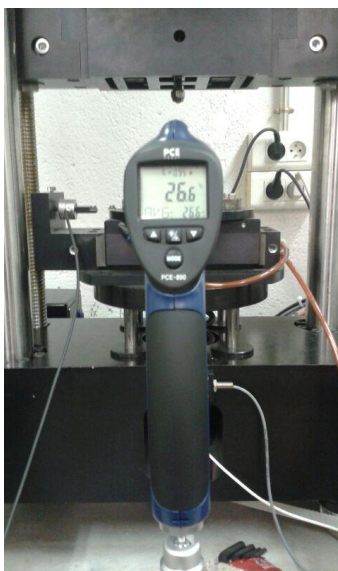


Figura 35. Termòmetre infraroig *PCE-890* de *Iberica*.

2.5. Caracterització mecànica

2.5.1. Assaig de desgast

El tribòmetre que s'ha utilitzat per fer els assajos de desgast és el TRM 1000 de la marca Wazau GmbH (figura 36).



Figura 36. Tribòmetre TRM 1000.

La tècnica que s'ha utilitzat per a realitzar els assajos de desgast s'anomena *dry sliding* o lliscament sense lubricant i consisteix en fer lliscar un pin o bola sobre la mostra, a una velocitat i carga determinada i a unes sèrie de distàncies variables per tal de comparar en cada cas els quatre tipus d'acer que s'han descrit. El resultat a simple vista de l'assaig es pot observar en la mostres de la figura 37.



Figura 37. Mostra J7 assajada a 10N.

El pin utilitzat en aquest assaig és una esfera d'acer (S52100) d'1 cm de diàmetre amb una duresa de 813 HV10, superior al material estudiat que té aproximadament una duresa de 240 HV10, en l'acer 2B, 300 HV10, en l'acer C850, 400 HV10, en l'acer C1050 i 430 HV10, en l'acer C1250.

Els paràmetres que s'han enumerat abans influeixen clarament en el desgast de la mostra, per això és important seleccionar les condicions de treball en que es realitzarà l'assaig:

- Càrrega aplicada = 10N, 80N
(Primerament s'han realitzat els assajos a 10N i un cop realitzats tots els assajos necessaris s'ha ampliat a 80N per analitzar millor la transformació martensítica)
- Velocitat de lliscament = 300 rpm
- Longitud de la petjada = 4 mm
- Distàncies de recorregut = 100, 200, 300, 500, 1000 metres.

Aquestes condicions s'han introduït al programa *Tribocontrol* que és el que controla el Tribòmetre. Aquest software està dividit en 2 finestres:

1. **Setup:** En aquesta finestra s'introdueix el nombre de "*strokes*" (la longitud de la petjada dividida entre dos), la velocitat de lliscament en rpm., la distància del recorregut "*sliding*" en m., i finalment permet anomenar l'arxiu per guardar-lo a l'ordinador.
2. **Control:** En aquesta finestra es pot inicialitzar l'assaig un cop s'hagin introduït tots els paràmetres en la finestra Setup i també ens permet fer un seguiment de l'assaig durant el temps que aquest s'està produint.

S'ha realitzat un seguit d'assajos per a cada un dels quatre tipus d'acer i per a cada una de les distàncies.

2.5.2. Microduresa

El microdurometre que s'ha utilitzat en aquest projecte és el *MVK-HO* d'*Akashi*, amb un penetrador piramidal Vickers de diamant (figura 38). Aquesta màquina pot realitzar càrregues des de 10g fins a 1000g i amb un temps de càrrega també variable de 5 a 60 segons. També disposa de dos objectius de 10 i 40 augments per observar les indentacions i un Nònius incorporat per a mesurar les diagonals de les indentacions.



Figura 38. *Microdurometre Akashi.*

La metodologia que s'ha seguit per a cada una de les mostres ha estat la següent:

1. Encendre el microdurometre.
2. Marcar amb un permanent els límits de la petjada.
3. Situar la mostra de manera que la secció transversal de la petjada quedi perpendicular al penetrador, com s'observa en la figura 39.
4. Fer baixa l'objectiu del microdurometre fins que gairebé estigui a tocar de la superfície de la mostra, però sense arribar a tocar-la, i anar ascendint progressivament fins que quedi ben enfocada la imatge.
5. Buscar i mesurar els límits de la petjada, que s'han marcat anteriorment, desplaçant els eixos X i Y per tal de trobar el punt mig que coincideix amb la zona de més profunditat de la petjada.
6. Desplaçar l'objectiu fins la zona on es troba la baquelita, és a dir, la zona més allunyada de la superfície per tal de realitzar una microindentació que permeti apuntar millor les pròximes indentacions.
7. Realitzar 3 microindentacions a la mateixa distància de la superfície cada cop, des de la superfície fins a la baquelita. Entre indentació i indentació es deixa una distància mínima superior a la diagonal de la indentació per tal de que aquesta no es vegi afectada per la indentació anterior.
8. Mesurar les diagonals de totes i cada una de les petjades per tal de omplir un full d'Excel que calcula la duresa Vickers mitjançant l'ecuació 5:

$$HV = 1,854 \cdot \frac{0,3 \text{ Kg}}{d^2} \quad (5)$$

9. Fotografiar amb el microscopi confocal les microindentacions que s'han realitzat per tal de mesurar a continuació les distàncies d'aquestes amb la superfície, mitjançant el programa *Adobe Photoshop*.

Per tal de poder avaluar totes les mostres per igual, s'han establert uns paràmetres fixos. Els assajos de duresa es realitzen amb càrregues inferiors a 1kg per ocupar la mínima superfície. En aquest projecte, totes les microindentacions s'han realitzat a 300 grams i durant 15 segons en tots els casos.

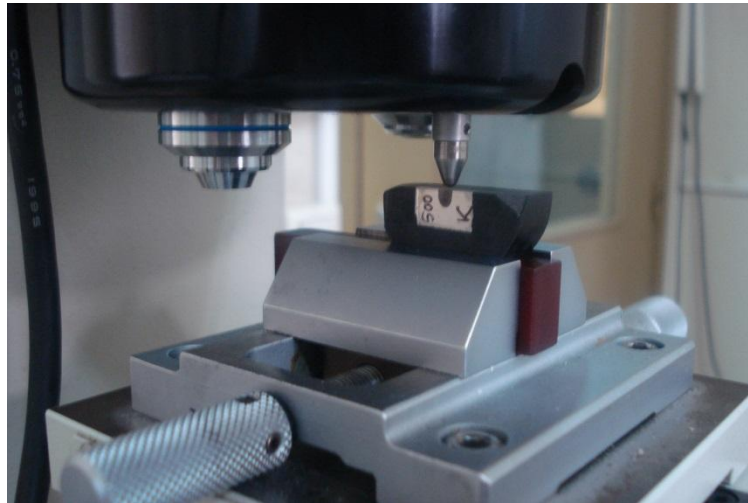


Figura 39. *Microindentació.*

2.6. Anàlisi del desgast

2.6.1. Mètode del volum desgastat a partir de la pèrdua de pes

Un cop s'ha assajat la mostra, i després de netejar-la, s'ha tornat a pesar per obtenir la diferència de pes, com s'ha explicat en l'apartat de preparació de mostres. Per tant, s'ha obtingut un valor del pes perdut per a cada mostra en grams, a partir del qual, i dividint-lo per la densitat del material obtenim el volum desgastat a partir de la pèrdua de pes.

Càlcul de la densitat de l'acer

Així doncs, prèviament s'ha seleccionat una mostra de cada tipus d'acer per tal de determinar-ne la densitat mitjançant la balança de precisió, a partir d'un programa incorporat a la pròpia balança i un muntatge que incorpora un recipient amb aigua, que calcula automàticament la densitat del material.

Taula 8. Pèrdua de pes en relació a la distància d'assaig.

Tipus d'acer	Densitat [g/cm ³]
Acer recuit (2B)	7,848 ± 0,009
Acer laminat (C850)	7,855 ± 0,000
Acer laminat (C1050)	7,855 ± 0,018
Acer laminat (C1250)	7,820 ± 0,008
Acer EN 1.4318 (promig)	7,845 ± 0,016

S'ha observat que els valors en els diferents tipus d'acer són força similars i per tant s'ha optat per fer els càlculs amb el valor promig de la densitat (taula 8).

Càlcul del volum

Un cop s'ha obtingut la densitat del material i a partir del pes perdut s'ha calculat el volum desgastat a partir de l'equació 6:

$$Volum\ desgastat = \frac{Pes\ perdut}{Densitat} \quad (6)$$

2.6.2. Mètode del volum desgastat amb perfilòmetre-2D

Per a calcular el volum desgastat amb perfilòmetre-2D, com s'ha explicat en l'apartat de *Preparació de les mostres*, s'han realitzat tres lectures del perfil de les petjades de desgast per obtenir-ne les àrees de desgast a partir del programa *Origin* (figura 40).

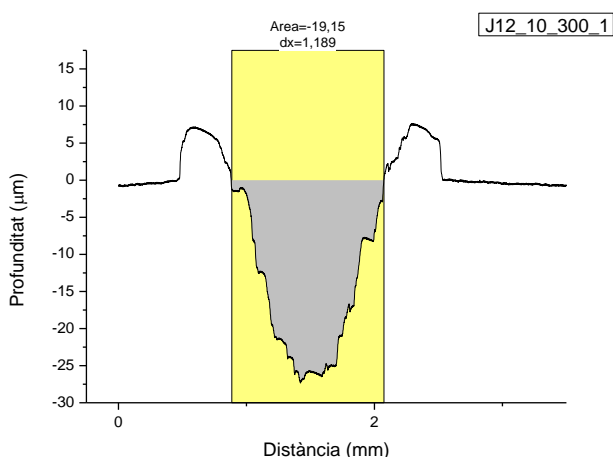


Figura 40a. Exemple del càlcul de l'àrea de la petjada.

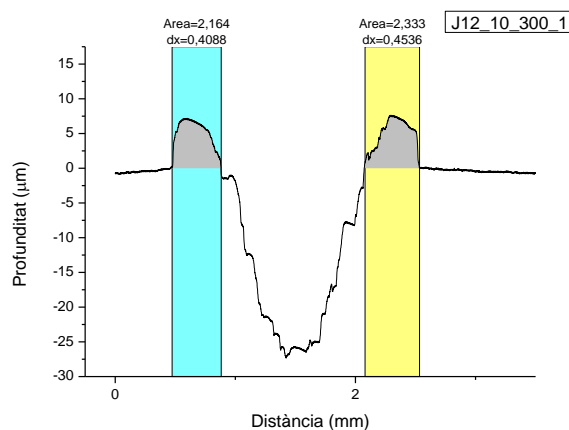


Figura 40b. Exemple del càlcul de l'àrea dels apilaments.

Tant per al càlcul del volum de desgast com pel volum dels apilaments s'ha emprat l'equació 7:

$$V_{\text{desgastat}} = \text{Àrea} \cdot x \quad (7)$$

On:

$V_{\text{desgastat}}$: és la quantitat de material desgastat [mm^3].

Àrea : és l'àrea de material desgastat o apilat, calculada amb el perfilòmetre-2D (figura 40) [mm^2].

x : és la longitud de la petjada [mm]

Longitud de petjada constant

En aquest mètode s'ha suposat que la longitud de les petjades és constant en tots els casos i amb un valor de 4 mm, establert a partir del paràmetre de recorregut del tribòmetre que s'ha indicat en l'apartat *Assaig de desgast*.

Per tant, el volum de desgast en aquest cas es calcula multiplicant la mitjana de les àrees obtingudes amb el perfilòmetre-2D per la longitud de la petjada de 4mm.

Longitud de petjada variable

Observant a simple vista les petjades de desgast, es va poder veure que aquestes tenien diferent longitud i sempre superior als 4 mm que inicialment s'havia suposat. Per tant, amb l'objectiu d'observar com aquest fet podia modificar els resultats, s'han recalculat els valors de volum desgastat.

Per tant, en aquest cas l'única diferència és que la longitud de la petjada no es considera constant, ja que prèviament s'ha mesurat amb un peu de rei per a cada una de les mostres assajades.

Així, el volum de desgast es calcula multiplicant el promig de les àrees del perfil de la petjada, obtingudes amb *Origin*, per la longitud mesurada de cada una de les mostres.

2.6.3. Mètode del volum desgastat amb perfilòmetre-3D

En aquest cas, a partir de la topografia de la petjada de desgast i els perfils longitudinals i transversals obtinguts amb el perfilòmetre-3D s'ha calculat el volum de desgast emprant un mètode d'integració numèrica.

Mitjançant el programa *Vision*, s'han obtingut una sèrie de valors x i y de 13 perfils separats 0,5 mm entre ells al llarg de la petjada de desgast (figura 41).

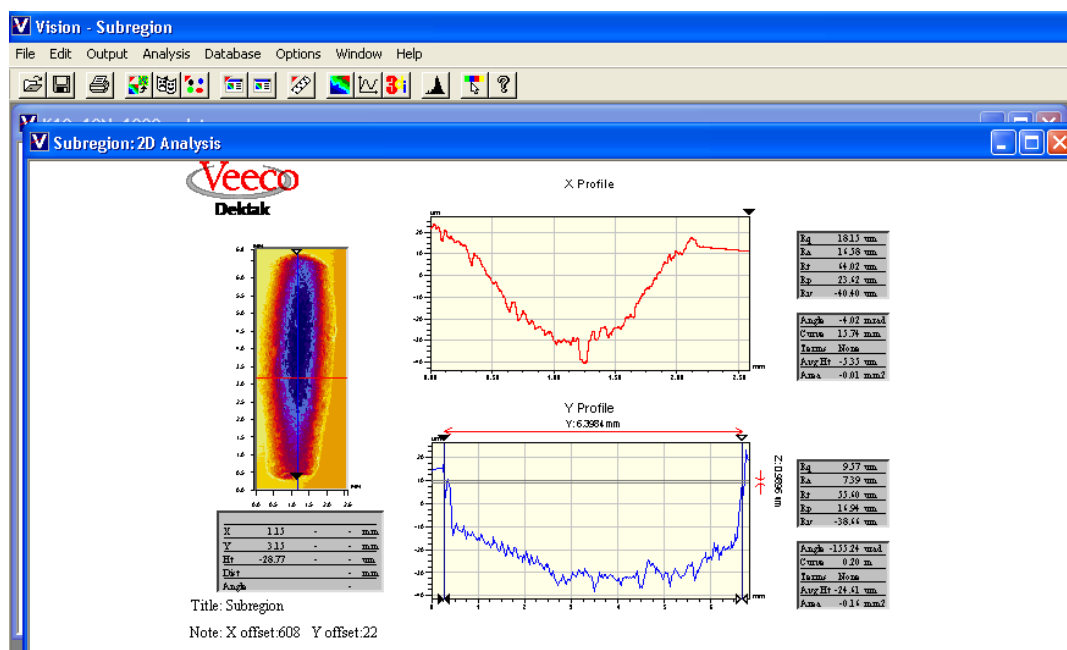


Figura 41. Exemple d'un dels 13 perfils.

En cada una d'aquestes sèries de perfils s'ha calculat l'àrea de desgast a partir d'un mètode d'integració numèrica, com s'observa en la figura 42, considerant l'equació següent:

$$\text{Àrea} = \sum_{i=1}^n (y_0 - y_i) \cdot \Delta x \quad (8)$$

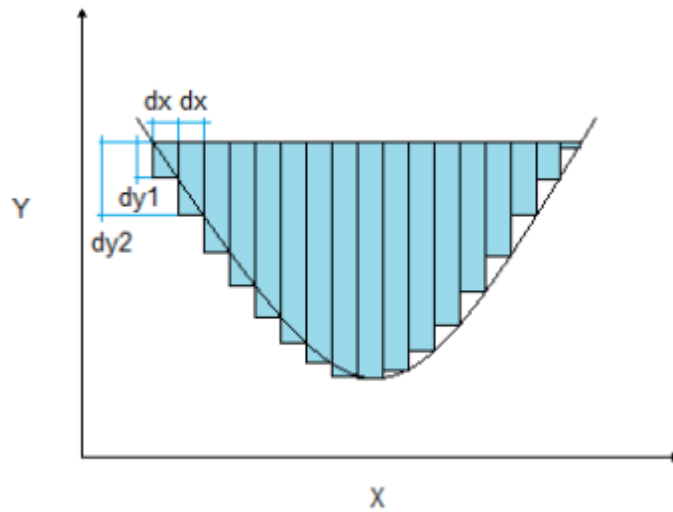


Figura 42. *Mètode d'integració numèrica.*

Un cop calculada l'àrea de cada un dels 13 perfils de la petjada, es multiplica cada una d'elles per 0,5mm ja que s'ha considerat que cada àrea calculada es manté constant 0,25mm a cada banda del perfil.

CAPÍTOL 3:

RESULTAT I DISCUSIÓ

3.1. Cinètica de desgast

S'han emprat dos mètodes per analitzar la resistència i la cinètica al desgast, que presenta l'acer estudiat en les condicions de recuit O i de laminat en fred J, K i L. En el primer cas, s'ha observat la pèrdua de pes que presenta la mostra just després de realitzar l'assaig. En canvi, en el segon cas s'avalua el desgast tenint en consideració el perfil de la petjada de desgast, de manera que a partir de tres mesures de les àrees de les seccions transversals de cada petjada s'obté una aproximació del volum de desgast.

3.1.1. Pèrdua de pes

Tot seguit es mostren la taules amb el resultat de la pèrdua de pes en relació a la distància recorreguda per a cada tipus d'acer assajat a 10N. Aquests resultats s'han obtingut a partir de la mitjana de les mostres considerades correctes i la seva desviació estàndard. Per últim, es mostra la gràfica conjunta dels quatre tipus d'acer assajats.

Taula 9. Pèrdua de pes en relació a la distància d'assaig.

Distància (m)	Pèrdua de pes (mg)			
	Acer O [37]	Acer J	Acer K	Acer L
100	0,250 ± 0,024	0,933 ± 0,057	1,183 ± 0,165	1,000 ± 0,100
200	0,333 ± 0,000	1,116 ± 0,401	1,383 ± 0,165	1,766 ± 0,057
300	0,633 ± 0,047	1,166 ± 0,546	1,533 ± 0,203	--
500	0,700 ± 0,047	1,522 ± 0,552	2,083 ± 0,024	2,333 ± 0,057
1000	1,117 ± 0,306	1,700 ± 0,424	2,366 ± 0,141	3,467 ± 0,000

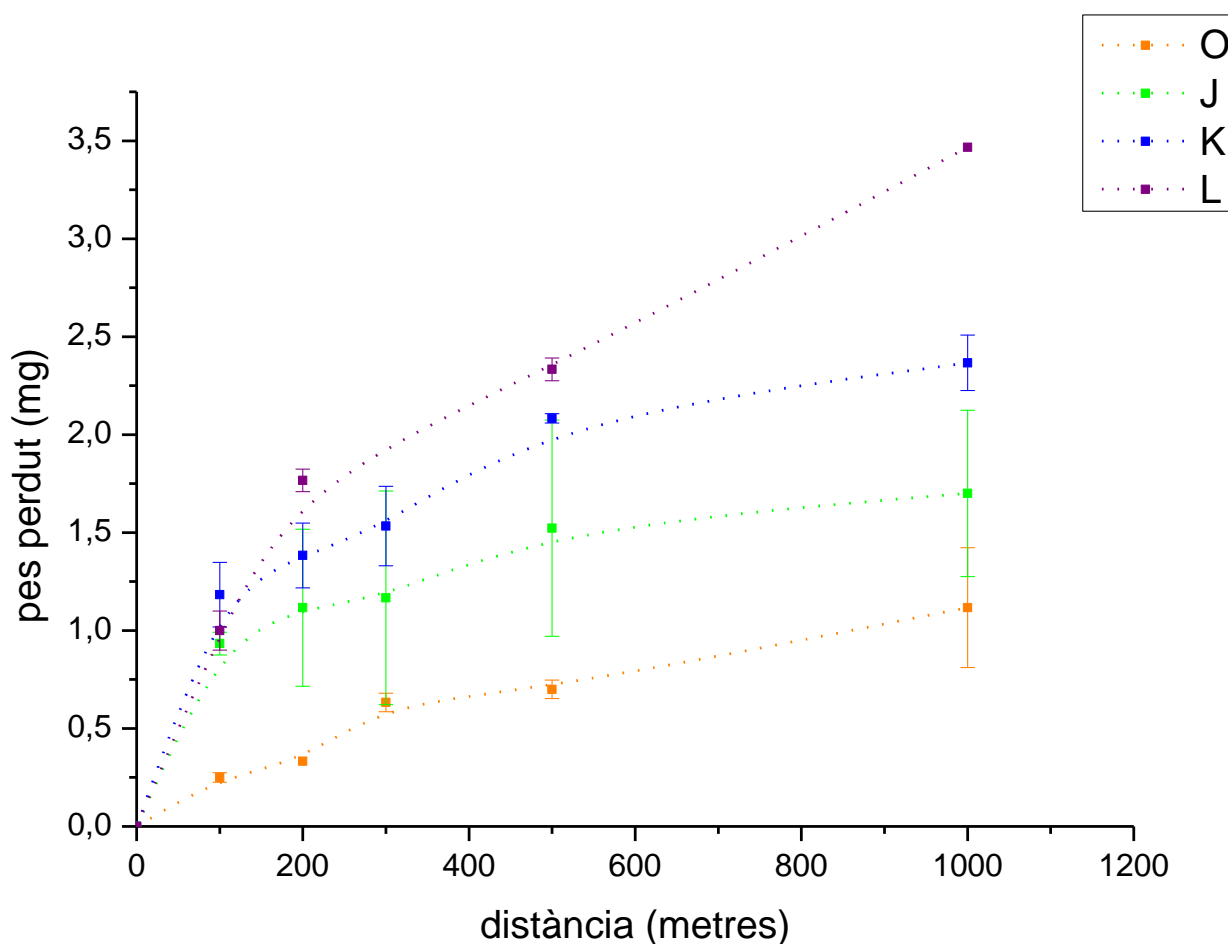


Figura 43. Evolució del pes perdut dels acers O, J, K i L.

Tenint en compte la figura 43 s'observa que a mesura que el percentatge inicial de martensita en l'acer és més gran el pes que es perd per desgast augmenta, és a dir, els resultats indiquen que la presència inicial de martensita condiciona de

forma significativa la resposta del material al desgast, disminuint la resistència al desgast de l'acer a mesura que el percentatge de martensita previ a l'assaig és més elevat.

Per altra banda, també s'observa que la pèrdua de pes va augmentant a mesura que la distància recorreguda és més llarga tot i així, aquest augment sembla estabilitzar-se passat els primers 500 m, excepte per a l'acer L on el pes que es perd va augmentant de forma lineal (figura 43).

3.1.2. Volum d'acer desgastat

Comparació dels mètodes de càlcul del volum desgastat

Existeixen diferents mètodes en la bibliografia per tal de estudiar la cinètica de desgast. En aquest apartat es comparen quatre mètodes diferents per tal de determinar quin d'ells és més representatiu del què realment té lloc en l'acer. Per aquest motiu, s'ha seleccionat una proveta, K, i s'ha assajat a 1000m. A partir d'aquí s'ha determinat el volum desgastat:

- 1- Considerant la mitjana de la mesura de tres àrees corresponents a la zona central de la petjada i prenent com a longitud de la petjada la que s'introdueix en el software de l'equip que és de 4mm (V_1).
- 2- Considerant la mitjana de la mesura de tres àrees corresponents a la zona central de la petjada i prenent com a longitud de la petjada la que s'obté després de l'assaig de (V_2).
- 3- Amb les mesures realitzades amb el perfilòmetre-3D seguint el procediment de càlcul indicat en l'apartat 2.6.3 (V_3).
- 4- Tenint en compte el pes perdut i calculant el volum a partir de la densitat de l'acer (V_4).

En la taula 10 es mostren els resultats i per tal de facilitar la seva comprensió s'adjunta la figura 44. En ella s'observa que el mètode més aproximat al volum suposadament real V_4 , és l'obtingut a partir de les mesures realitzades amb el perfilòmetre-3D, V_3 . No obstant, aquest mètode presenta l'inconvenient de necessitar una gran quantitat de temps per a realitzar l'anàlisi de cada una de les mostres que s'han assajat, aprox. 8-10 hores per mostra i conseqüentment un cost massa elevat per al projecte. Per altra banda, la diferència significativa que hi ha entre els volums V_1 i V_2 obtinguts a partir de les mitjanes de les àrees amb un perfilòmetre-2D respecte al V_4 ha estat determinant per a decidir presentar els resultats de la cinètica de desgasta a partir de les mesures del pes perdut.

Taula 10. Comparativa dels mètodes de càlcul del volum desgastat per a la mostra K10.

V_1 (L=4mm) [mm ³]	V_2 (Li) [mm ³]	V_3 (Perfil.) [mm ³]	V_4 (Densitat) [mm ³]
0,161 ± 0,007	0,257 ± 0,002	0,288 ± 0,000	0,301 ± 0,018

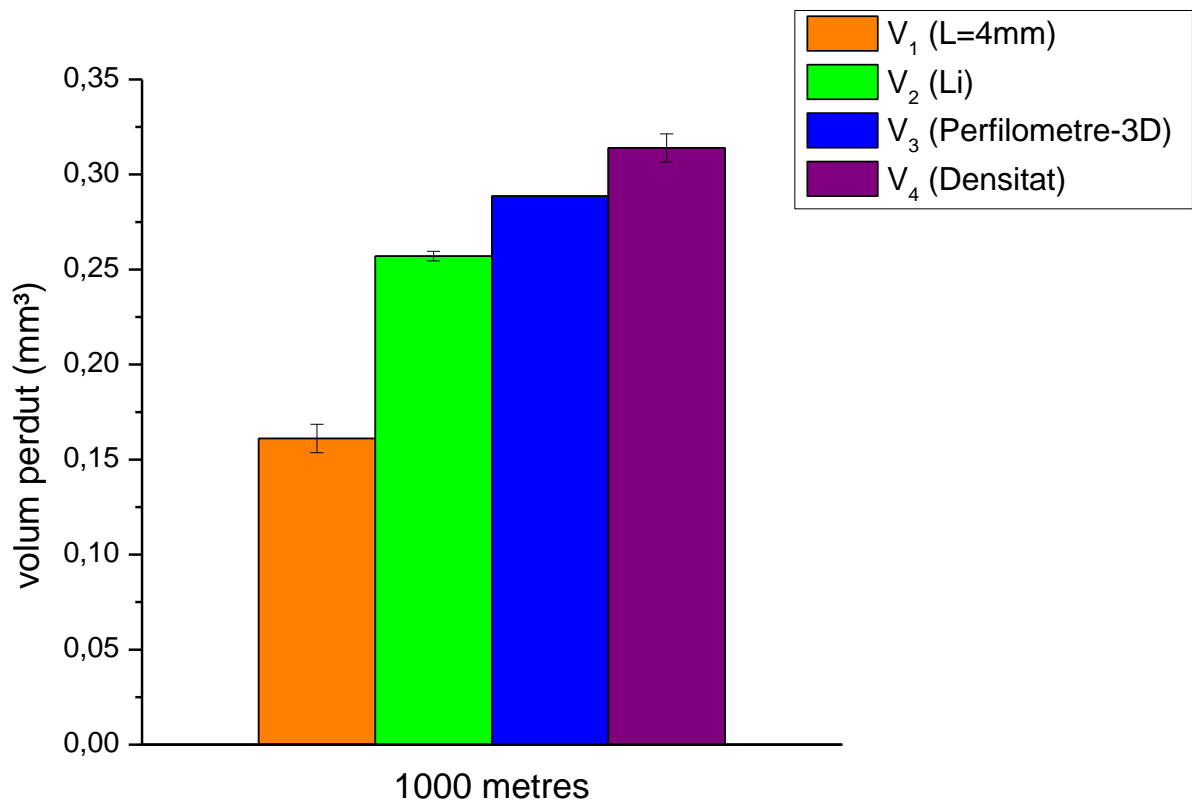


Figura 44. Comparativa dels mètodes de càlcul de volum desgastat en la mostra K10.

Volum desgastat

Així doncs, a partir del *Mètode de la pèrdua de pes* i el valor de la densitat calculada s'obté la cinètica de desgast expressada en mm^3 per a les diferents condicions de l'acer estudiades en aquest projecte. En la figura 45 es pot veure com a mesura que augmenta la distància augmenta el volum desgastat en la petjada, tot i que hi ha una certa progressió cap a l'estabilització en les condicions O, J i K. No obstant, per a la condició L, aquesta pèrdua de volum augmenta seguint una tendència lineal.

Taula 11. Volum desgastat en relació a la distància d'assaig.

Distància (m)	Volum desgastat (mm ³)			
	Acer O	Acer J	Acer K	Acer L
100	0,032 ± 0,003	0,120 ± 0,057	0,151 ± 0,021	0,129 ± 0,013
200	0,043 ± 0,000	0,144 ± 0,051	0,176 ± 0,021	0,227 ± 0,057
300	0,082 ± 0,006	0,150 ± 0,070	0,195 ± 0,026	--
500	0,090 ± 0,006	0,196 ± 0,071	0,265 ± 0,003	0,301 ± 0,007
1000	0,144 ± 0,039	0,219 ± 0,054	0,301 ± 0,018	0,447 ± 0,000

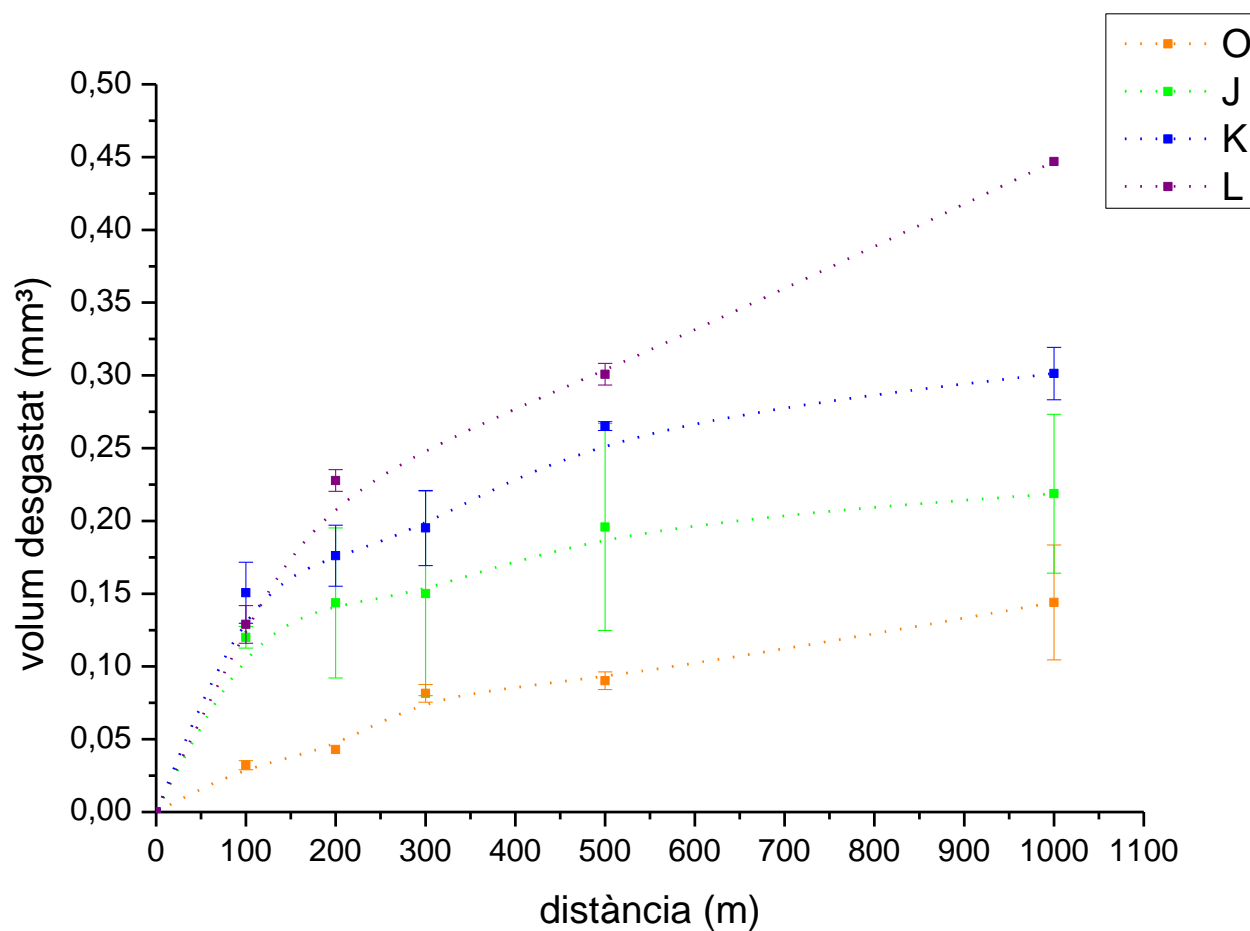


Figura 45. Evolució del volum perdut dels acers O, J, K i L.

Perfils de desgast

Una altre aspecte força representatiu i visual de l'evolució del volum desgastat és la representació del perfil de les petjades en funció dels metres recorreguts. En la figura 46, s'observa clarament que tant la profunditat com l'amplada de la petjada augmenten en funció dels metres recorreguts en l'assaig de desgast per als acers J i K.

Per altra banda, també s'observa diferències entre els acers J i K, ja que en l'últim, la profunditat del perfil és major en comparació amb el primer.

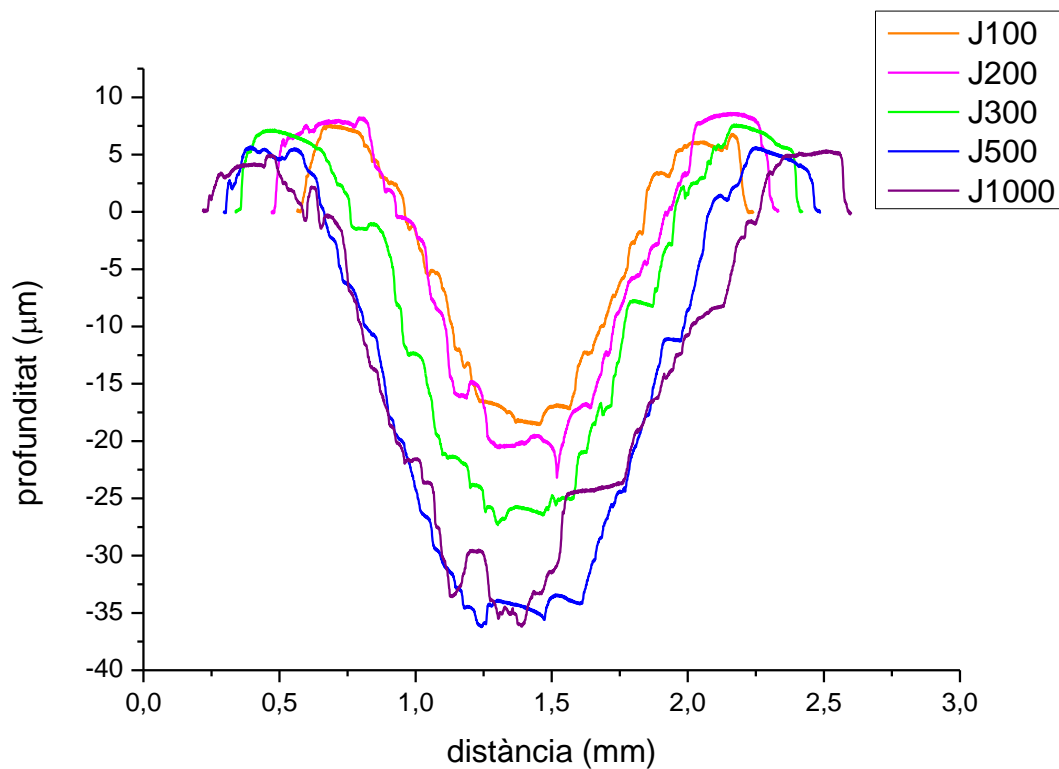


Figura 46a. *Evolució de les petjades segons la distància recorreguda de l'acer J.*

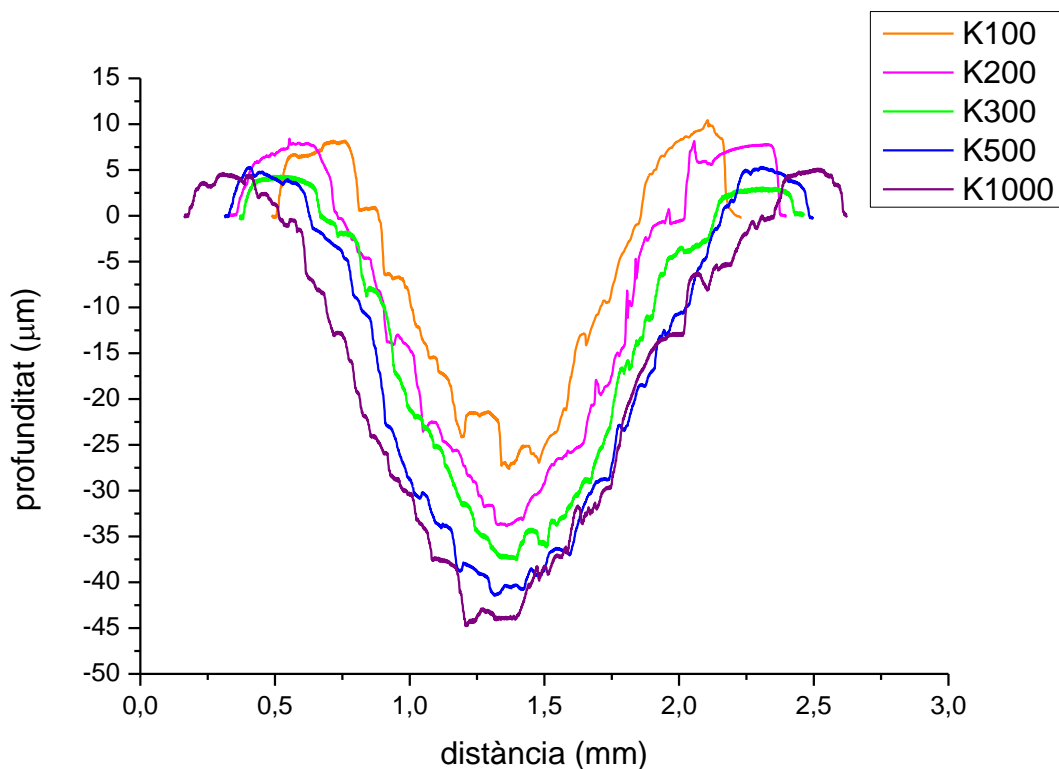


Figura 46b. Evolució de les petjades segons la distància recorreguda de l'acer K.

3.1.3. Velocitat de desgast (wear rate)

La velocitat de desgast o *Wear rate* indica la velocitat en que s'ha desgastat el material i es calcula a partir de la següent expressió:

$$\text{Velocitat de desgast} = \frac{V_{\text{desgastat}}}{F \cdot L} \quad (9)$$

On:

Volum desgastat: volum desgastat (taula 11) [mm³]

L: distància recorreguda en cada assaig [m].

F: força que s'aplica durant l'assaig (F=10N).

A continuació es mostra l'evolució de la velocitat de desgast en relació a la distància recorreguda en cada assaig per a cada un dels tipus d'acer.

Taula 12. *Velocitat de desgast per l'acer O.*

Distància (m)	Velocitat de desgast (mm³/N·m)
100	3,22E-05 ± 3,09E-06
200	2,15E-05 ± 0,00E+00
300	2,72E-05 ± 2,02E-06
500	1,80E-05 ± 1,21E-06
1000	1,44E-05 ± 3,95E-06

Taula 13. *Velocitat de desgast per l'acer J.*

Distància (m)	Velocitat de desgast (mm³/N·m)
100	1,20E-04 ± 7,43E-06
200	7,18E-05 ± 2,58E-05
300	5,00E-05 ± 2,34E-05
500	3,92E-05 ± 1,42E-05
1000	2,19E-05 ± 5,46E-06

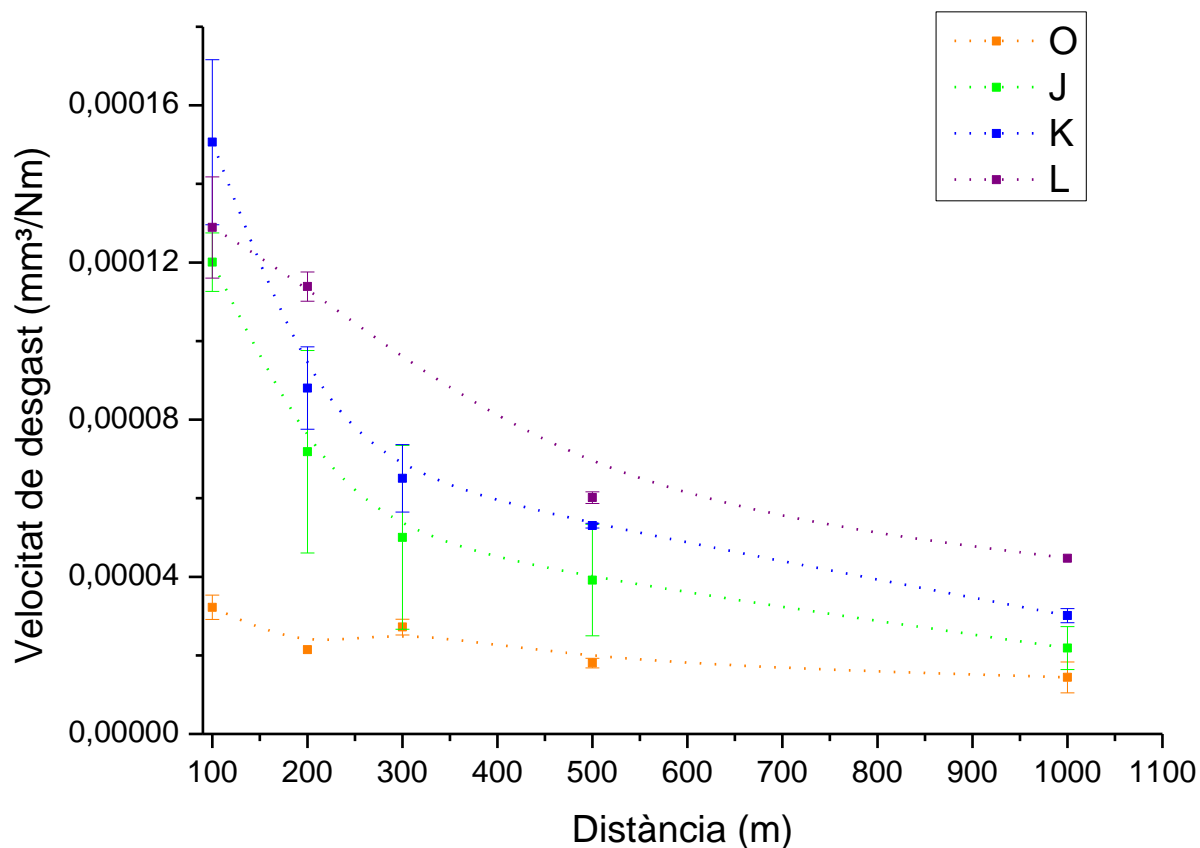
Taula 14. *Velocitat de desgast per l'acer K.*

Distància (m)	Velocitat de desgast (mm³/N·m)
100	1,51E-04 ± 2,10E-05
200	8,80E-05 ± 1,05E-05
300	6,51E-05 ± 8,60E-06
500	5,30E-05 ± 6,00E-07
1000	3,01E-05 ± 1,80E-06

Taula 15. Velocitat de desgast per l'acer L.

Distància (m)	Velocitat de desgast ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)
100	$1,29\text{E-}04 \pm 1,29\text{E-}05$
200	$1,14\text{E-}04 \pm 3,72\text{E-}06$
300	-
500	$6,02\text{E-}05 \pm 1,49\text{E-}06$
1000	$4,47\text{E-}05 \pm 0,00\text{E+}00$

A partir dels resultats descrits en les taules 12-15, s'ha representat gràficament la velocitat de desgast per a les quatre condicions de l'acer estudiades (figura 47). Com es pot observar la velocitat de desgast és més elevada a mesura que el percentatge inicial de martensita és més gran. A mesura que la distància recorreguda augmenta, la velocitat de desgast disminueix per a totes les condicions i tendeix a estabilitzar-se.

**Figura 47.** Velocitat de desgast en funció de la distància recorreguda dels acers O, J, K i L.

3.2. Anàlisi de les petjades de desgast

3.2.1. Apilaments

Per al càlcul del volum dels apilaments, s'ha seguit el mateix procediment que en el càlcul del volum pel mètode del perfilòmetre-2D descrit en el l'apartat *Anàlisi del desgast*.

- **Acer O**

Taula 16. Volum dels apilaments de l'acer O.

Distància (m)	Volum d'apilaments (mm ³) [38]	
	Esquerre	Dret
100	0,0096 ± 0,0017	0,0097 ± 0,0021
200	0,0103 ± 0,0021	0,0069 ± 0,0006
300	0,0185 ± 0,0023	0,0149 ± 0,0032
500	0,0144 ± 0,0023	0,0139 ± 0,0019
1000	0,0113 ± 0,0016	0,0107 ± 0,0022

En la taula 16, s'observa que el volum dels apilaments per l'acer O augmenta progressivament fins als 300 metres, a partir dels quals es produeix una lleu disminució d'aquest.

- **Acer J**

Taula 17. Volum dels apilaments de l'acer J.

Distància (m)	Volum d'apilaments (mm ³)	
	Esquerre	Dret
100	0,0080 ± 0,0008	0,0082 ± 0,0008
200	0,0114 ± 0,0005	0,0114 ± 0,0013
300	0,0087 ± 0,0011	0,0086 ± 0,0015
500	0,0087 ± 0,0016	0,0087 ± 0,0012
1000	0,0063 ± 0,0011	0,0065 ± 0,0016

En la taula 17, s'observa un comportament similar que en l'acer O, però en aquest cas el volum dels apilaments augmenta fins als 200 metres i aleshores disminueix progressivament fins que als 1000m aquest volum és la meitat.

- **Acer K**

Taula 18. Volum dels apilaments de l'acer K.

Distància (m)	Volum d'apilaments (mm ³)	
	Esquerre	Dret
100	0,0118 ± 9,89E-5	0,0099 ± 0,0017
200	0,0070 ± 0,0016	0,0066 ± 0,0004
300	0,0054 ± 0,0021	0,0048 ± 0,0016
500	0,0077 ± 0,0016	0,0056 ± 0,0003
1000	0,0035 ± 0,0008	0,0031 ± 0,0007

En la taula 18, s'observa que el volum dels apilaments és màxim al cap de 100m de recorregut i disminueix a mesura la distància recorreguda augmenta.

- **Acer L**

Taula 19. Volum dels apilaments de l'acer L.

Distància (m)	Volum d'apilaments (mm ³)	
	Esquerre	Dret
100	0,0097 ± 0,0030	0,0096 ± 0,0010
200	0,0080 ± 0,0017	0,0114 ± 0,0002
300	0,0061 ± 0,0012	0,0045 ± 0,0008
500	0,0037 ± 0,00091	0,0061 ± 0,0009
1000	0,0032 ± 0,0004	0,0031 ± 0,0014

Per a l'acer L, en la taula 19, s'ha observat un comportament molt similar al de l'acer K. En ambdós casos, el volum dels apilaments a 1000m és aproximadament un terç del volum dels apilaments a 100m de distància.

En la figura 48 es representen conjuntament les dades del volum dels apilaments en funció de la condició de l'acer i la distància recorreguda. Com es pot observar l'acer recuit, que és el més dúctil de tots, presenta un volum dels apilaments que van augmentant fins als 300 m, a partir d'aquesta distància el volum va disminuint fins als 1000m. L'explicació d'aquest fenomen es pot descriure si es té en compte que a mesura que la distància de desgast augmenta l'acer en superfície es va endurint fet que provoca la pèrdua de capacitat de deformar plàsticament i com a conseqüència una disminució de la quantitat de material que s'acumula en superfície. Aquesta tendència també apareix per a la resta de condicions, tot i que a distàncies menors, per a la condició J a partir dels 200m, i les condicions K i L els 100m.

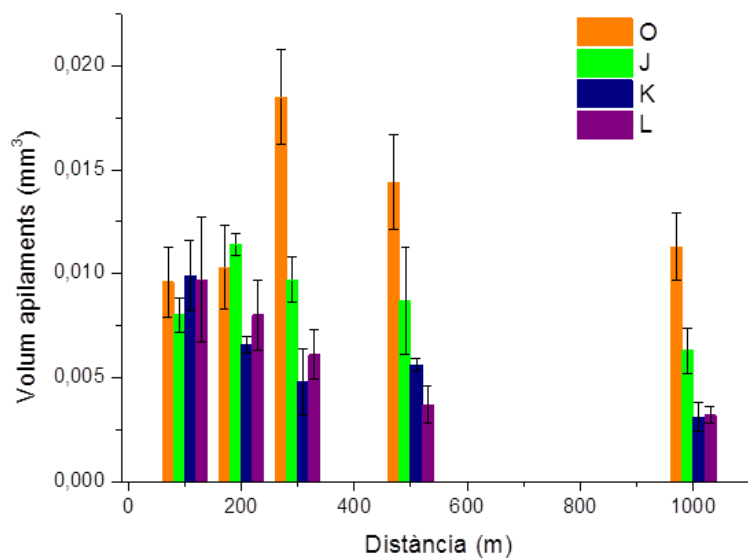


Figura 48. *Evolució del volum dels apilaments en funció de la distància recorreguda.*

3.2.2. Coeficient de fricció

S'ha analitzat els coeficients de fricció per a cada tipus d'acer en funció de la distància assajada i s'ha observat que aquest oscil·la pràcticament en el mateix interval al llarg de l'assaig de desgast.

- **Acer O**

En aquest cas els assajos de desgast es van dur a terme amb una força de 80 N. Els valors del coeficient de fricció oscil·len entre 0,20 i 1,0.

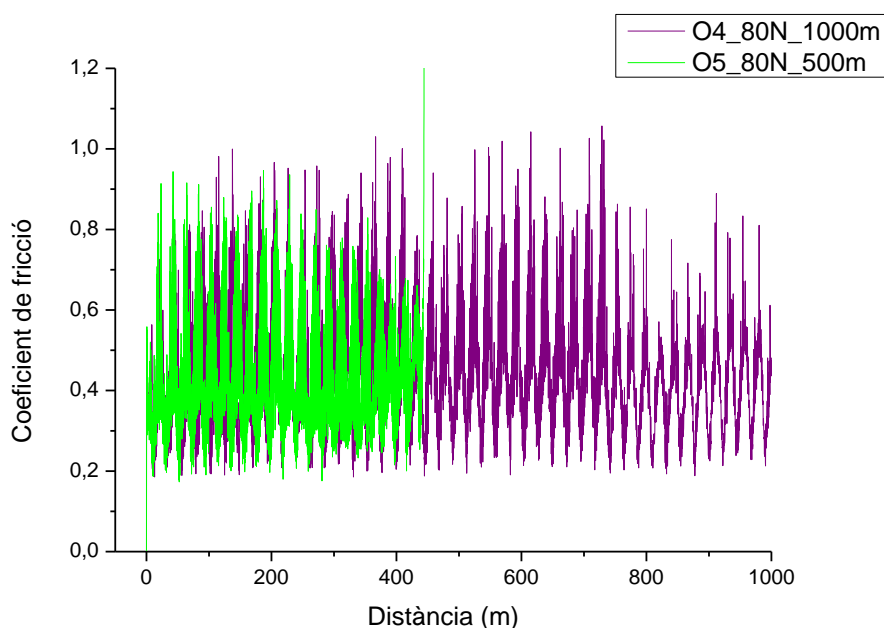


Figura 49. Coeficient de fricció per les mostres O4 i O5 a 80N.

- **Acer J**

En el següent gràfic s'observa com al llarg de la distància recorreguda el coeficient de fricció varia entre el 0,35 i 0,90. Com caldria esperar aquest valors són menors als obtinguts per a la condició O, ja que la càrrega aplicada per l'acer O és superior.

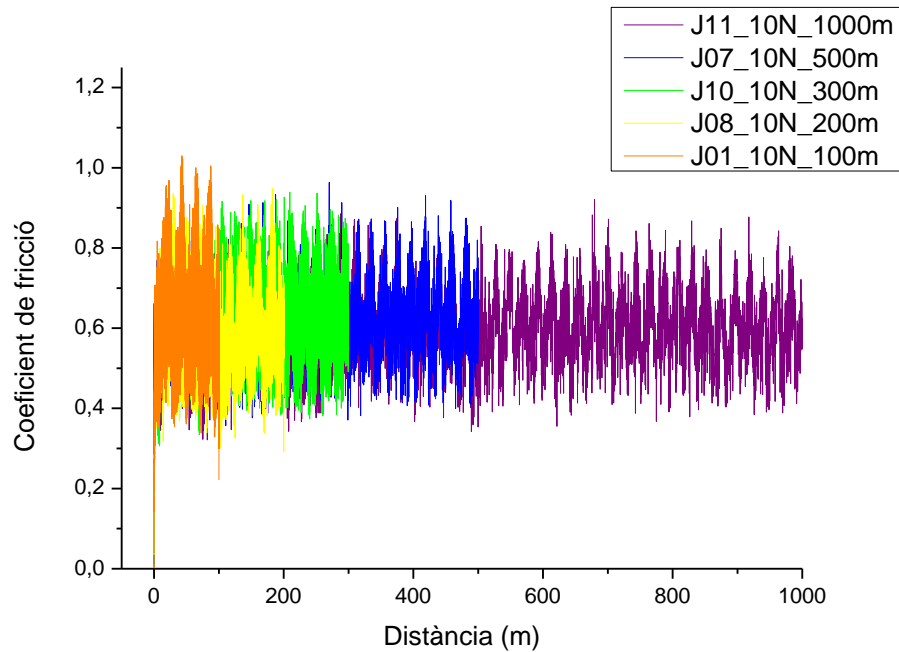


Figura 50. Coeficient de fricció de mostres de l'acer J a 10N i a diferents distàncies.

- **Acer K**

L'acer K es comporta de forma similar a l'acer J, amb valors del coeficient de fricció que oscil·len entre 0,35 i 0,90 durant tota la distància recorreguda, com s'observa en la figura 51.

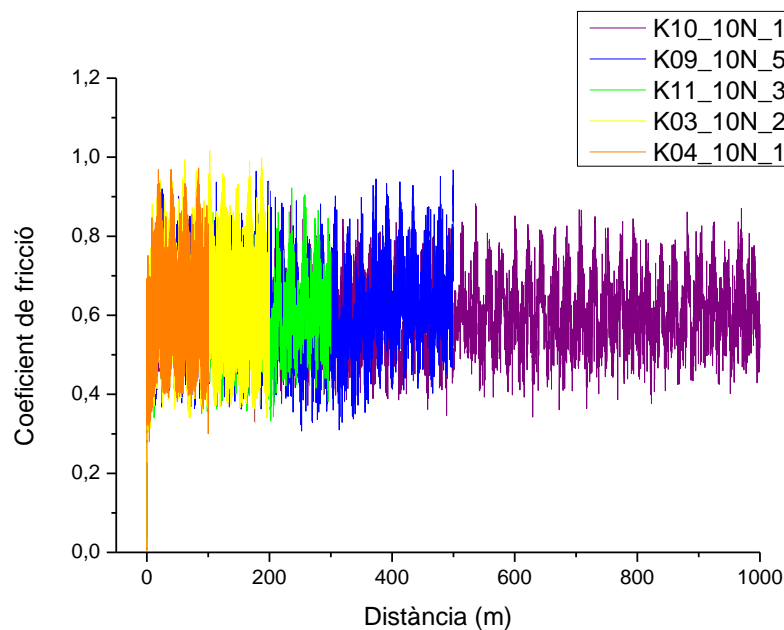


Figura 51. Coeficient de fricció de mostres de l'acer K a 10N i a diferents distàncies.

- **Acer L**

Pel que fa a l'acer L, tampoc observem diferències en comparació als acers J i K ja que els valors del coeficient de fricció es troben també entre 0,35 i 0,90.

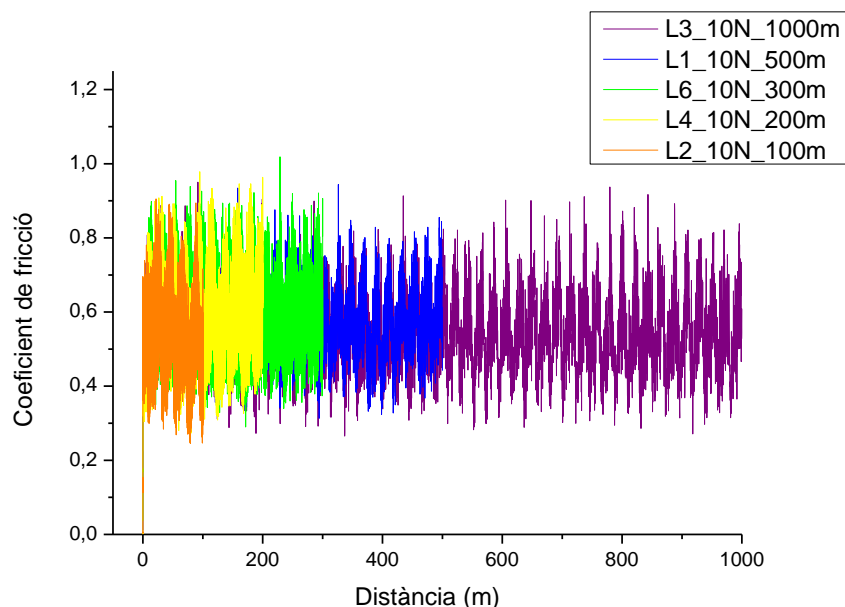


Figura 52. Coeficient de fricció de mostres de l'acer L a 10N i a diferents distàncies.

Efecte de la temperatura

Com s'ha explicat en l'apartat *Caracterització de la superfície*, es va realitzar un experiment per tal de quantificar la variació de la temperatura en la superfície durant l'assaig de desgast. Cal destacar que amb aquest equip de mesura, no es va observar en cap moment variacions significatives de la temperatura.

3.2.3. Perfil de dureses

Per tal d'analitzar l'evolució de la duresa en la superfície de la petjada de desgast, s'han realitzat assajos per a cadascuna de les condicions de l'acer a una distància de 100, 500 i 1000 metres, amb una força de 80N amb la que s'obtenen profunditats de petjada més grans que a 10N, d'aquesta manera, és més fàcil identificar el seu perfil en la secció transversal.

- **Acer O**

En la figura 53, s'observa que no hi ha diferències significatives entre els valors de duresa obtinguts per als assajos realitzats a partir de les tres distàncies de recorregut. Tenint en compte que el valor s'estabilitza a 300HV0.3, a la meitat de l'espessor de la mostra (700-800 μm), cal destacar que l'efecte de la bola sobre la superfície al llarg de l'assaig provoca un increment de duresa per a les primeres 200-250 μm de fins a un valor de 460HV0.3. Aquest increment suposa un augment de la duresa en superfície de més del 50% comparat amb la de l'acer abans d'assajar. Aquest increment en la duresa tan pot ser conseqüència de la transformació de fase d'austenita a martensita així com de l'enduriment dels propis grans austenítics.

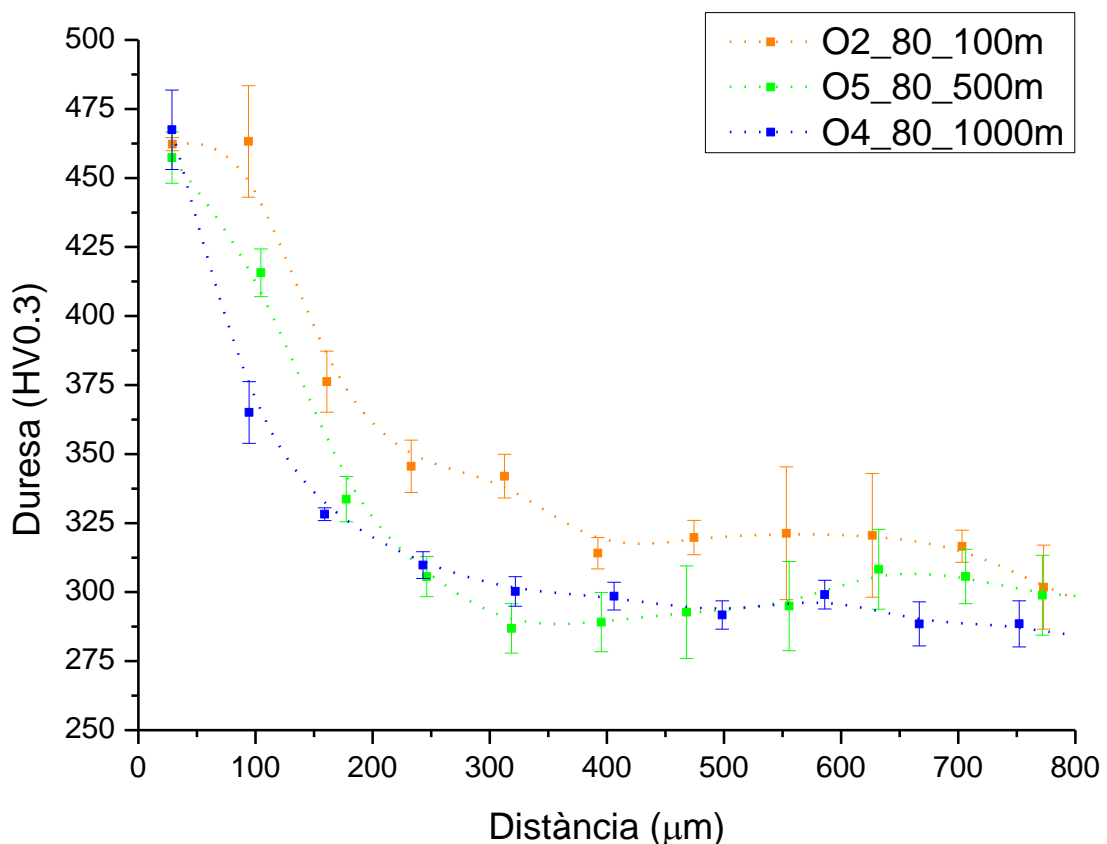


Figura 53. Evolució de la duresa al llarg de la superfície en funció de la distància recorreguda per l'acer O.

En la figura 54 és mostra una imatge representativa de les microduresa realitzades des de la superfície cap a l'interior del material en la zona de més profunditat de la petjada.

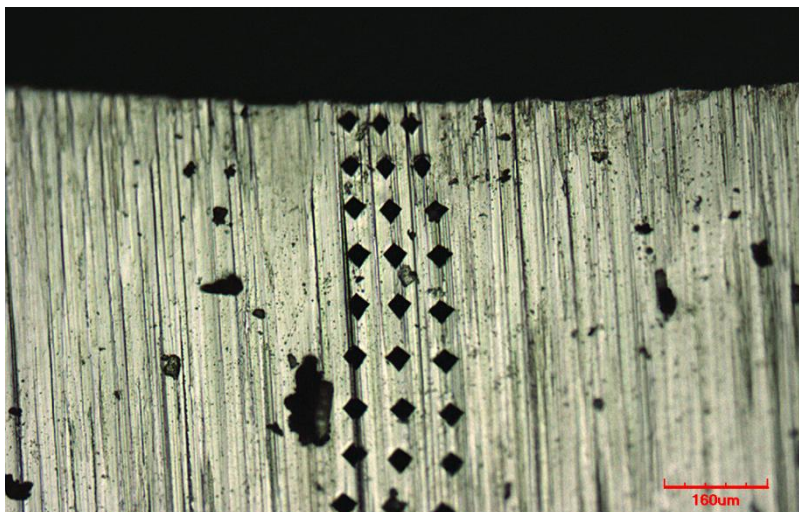


Figura 54. Exemple de les microindentacions en la mostra O2.

- **Acer J**

En l'acer J, es comença a veure algunes diferències entre les diferents distàncies assajades, ja que per a 100 metres la duresa més superficial és d'uns 450HV0.3 i en canvi per a 1000m aquesta es gairebé de 500HV0.3, figura 55. D'altra banda, també s'observa una forta davallada de la duresa que arriba a estabilitzar-se als 340HV0.3 a partir de les 225-250 µm.

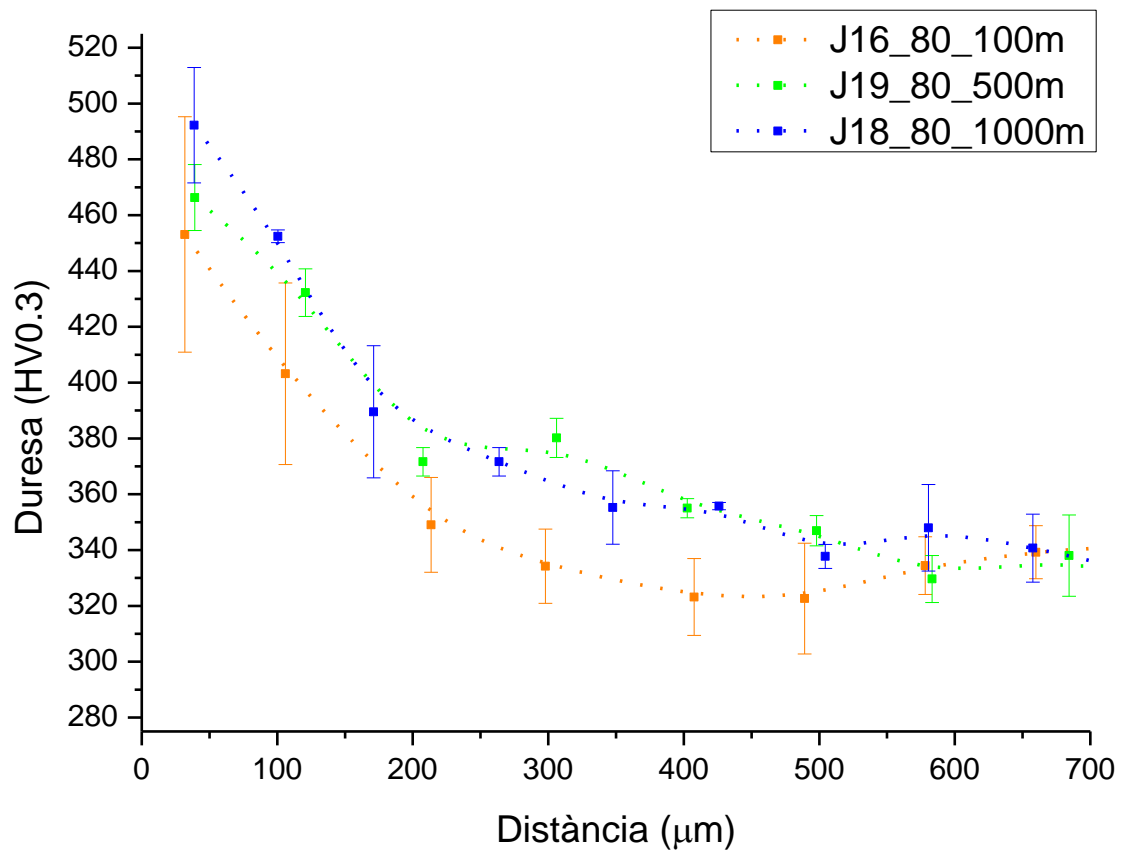


Figura 55. *Evolució de la duresa al llarg de la superfície en funció de la distància recorreguda per l'acer J.*

- **Acer K**

L'acer K es comporta de forma similar que l'acer J, per a distàncies curtes els valors de duresa en superfície són lleugerament inferiors si es comparen a 500 i 1000m, figura 56. Tot i així, el que s'ha de remarcar és que per a aquesta condició el valor de duresa queda estabilitzat a partir de les 150 µm.

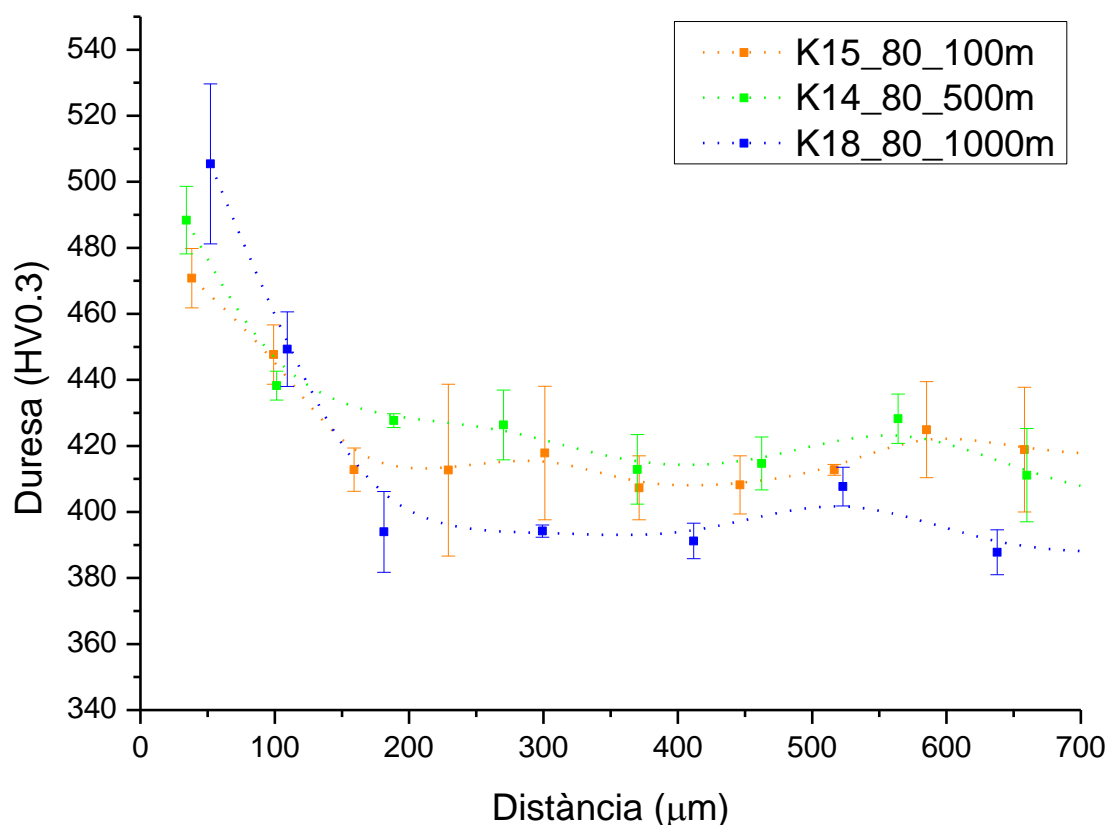


Figura 56. Evolució de la duresa al llarg de la superfície en funció de la distància recorreguda per l'acer K.

- **Acer L**

Els valors duresa obtinguts per l'acer L segueixen la mateixa tendència que per a la condició K, a partir de les 150 μm el valor de duresa s'estabilitza. Aquesta evolució és diferent a l'obtinguda per a les condicions O i J, en les que la duresa es manté constant a partir de les 200-250 μm. El motiu per aquest diferent comportament pot trobar-se si es té en compte que tan l'acer O com el J, degut a què presenten percentatges inicials de martensita inferiors, són materials més tou i amb una capacitat més gran de deformar plàsticament, mentre que l'acer K i L, amb percentatge inicials de martensita més elevats, presenten a l'inici dureses més altes i menys capacitat de deformar plàsticament fet que implica que la zona deformada sigui menor.

Com també es pot observar en el gràfic, en la petjada més propera a la superfície la duresa després de 1000m de recorregut és inferior a la de 500m. Una possible explicació a aquest fet pot venir donada al fet que la petjada hagi quedat situada en una zona amb poca presència de martensita. Una altre possible resposta pot venir directament relacionada amb la validesa de l'assaig realitzat a 1000m, com es pot observar en la figura 58 el pes perdut a 1000 m és inferior a 500m. Seria necessari tornar a repetir aquest estudi per aquesta mateixa condició a 1000m de recorregut, tasca que no ha estat possible realitzar en aquest projecte i que queda pendent realitzar en treballs futurs.

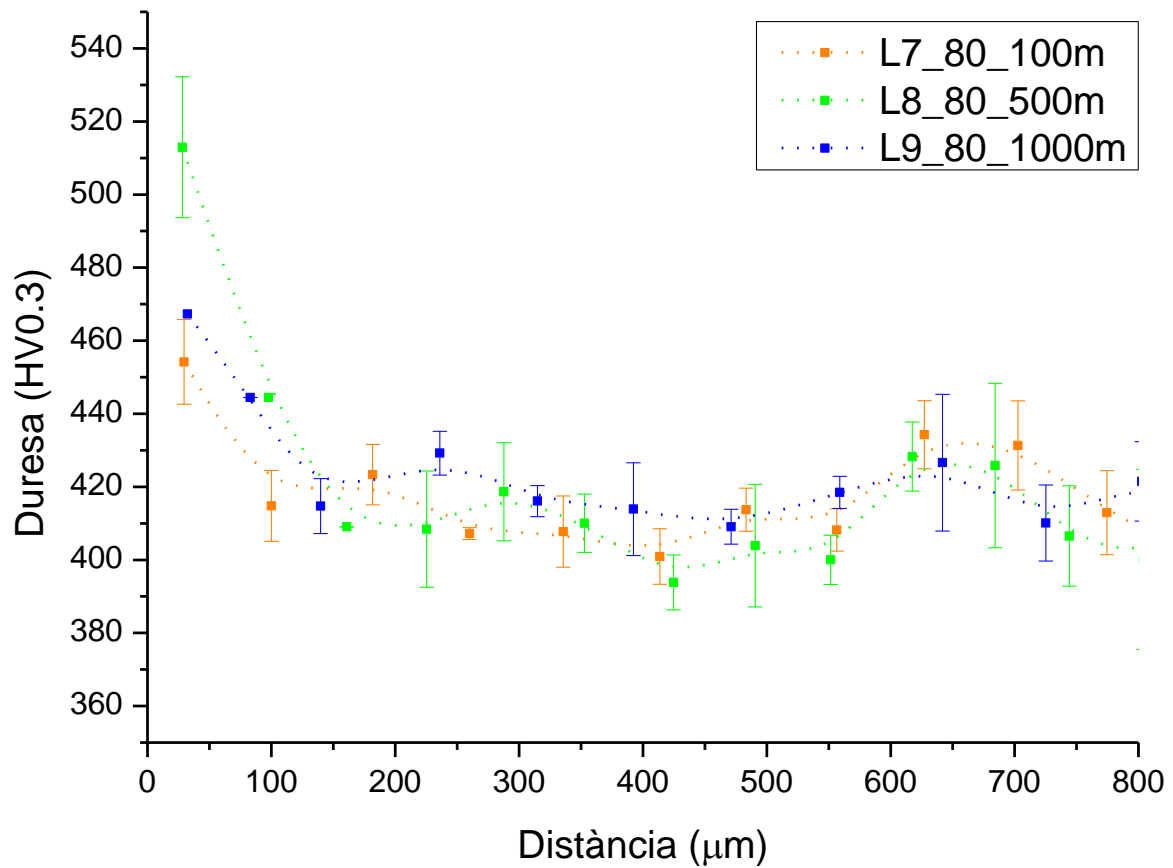


Figura 57. *Evolució de la duresa al llarg de la superfície en funció de la distància recorreguda per l'acer L.*

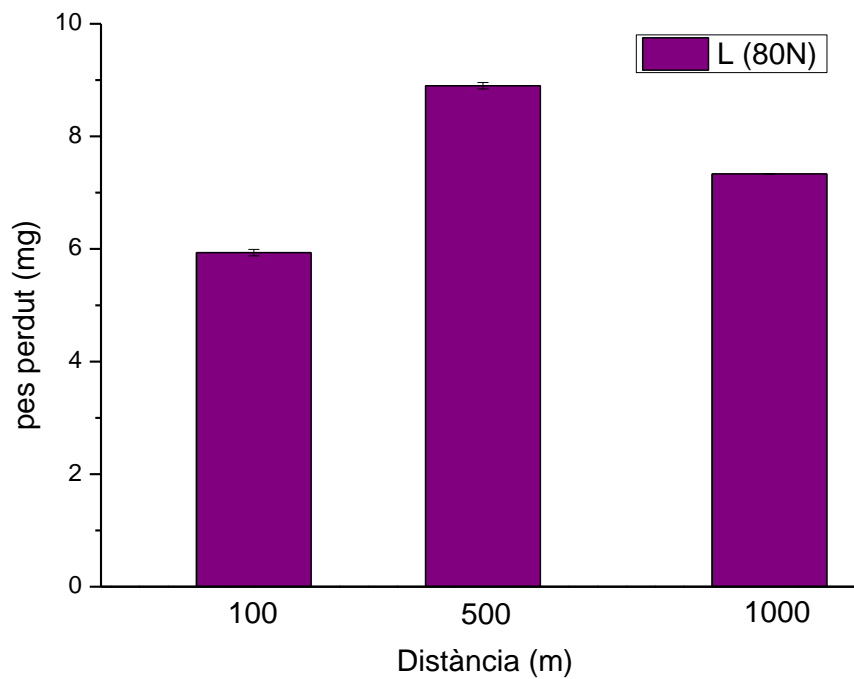


Figura 58. *Evolució de la pèrdua de pes a 80N per a l'acer L.*

- **Comparativa dels perfils de dureses per als diferents tipus d'acer**

A continuació, es representa en un mateix gràfic l'evolució de la duresa per els diferents tipus d'acer en una distància assajada determinada, és a dir, per a 100, 500 i 1000m respectivament.

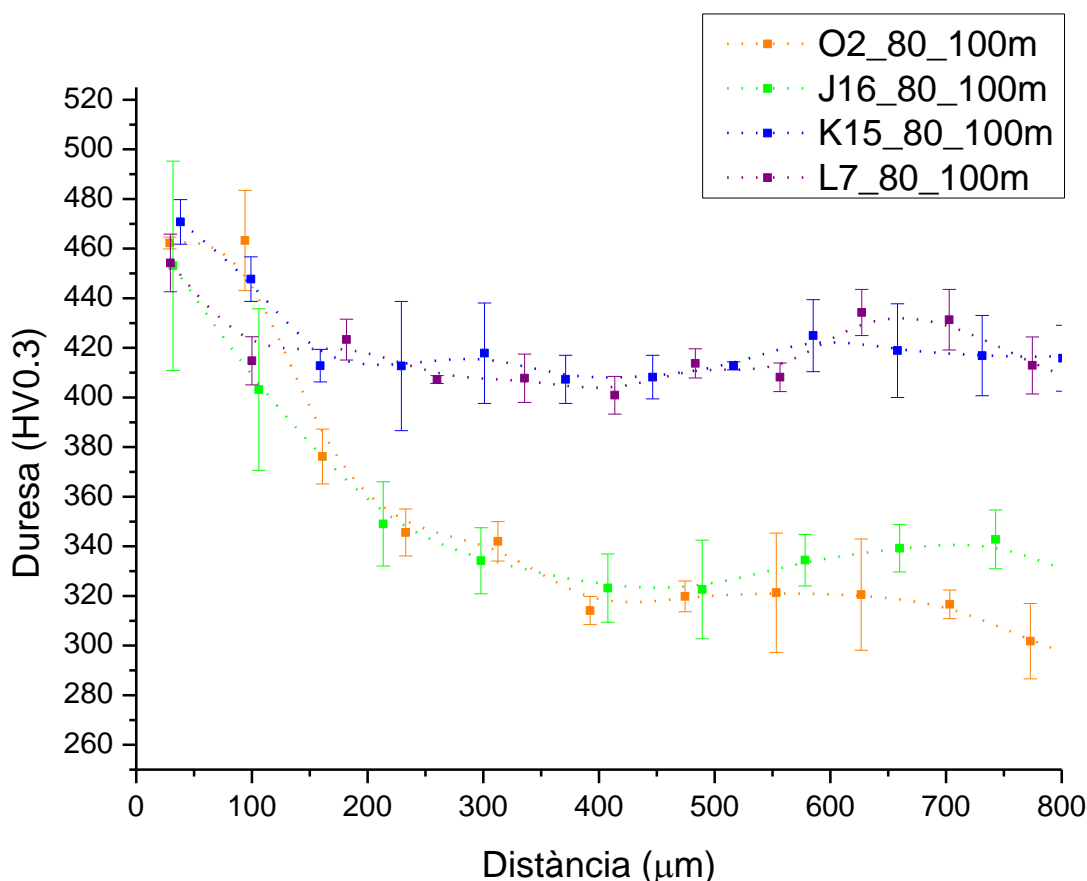


Figura 59. Evolució de la duresa per als acers O, J, K i L assajats a 80N i 100 m.

Observant la figura 59, s'ha pogut constatar com, tot i que en un principi la duresa més superficial es gairebé igual en tots els acers amb valors de 450 a 470 HV0.3, ràpidament la duresa divergeix en dos grups, els que tenen menys martensita inicial (O i J) i els que tenen més martensita inicial (K i L). Pel que fa al segon grup, sembla que ràpidament, a partir de les 150 μm convergeix cap a valors de duresa de 420 a 430 HV0.3, en canvi, pel primer grup s'estabilitza a les 250 μm amb valors de duresa de 330 HV0.3.

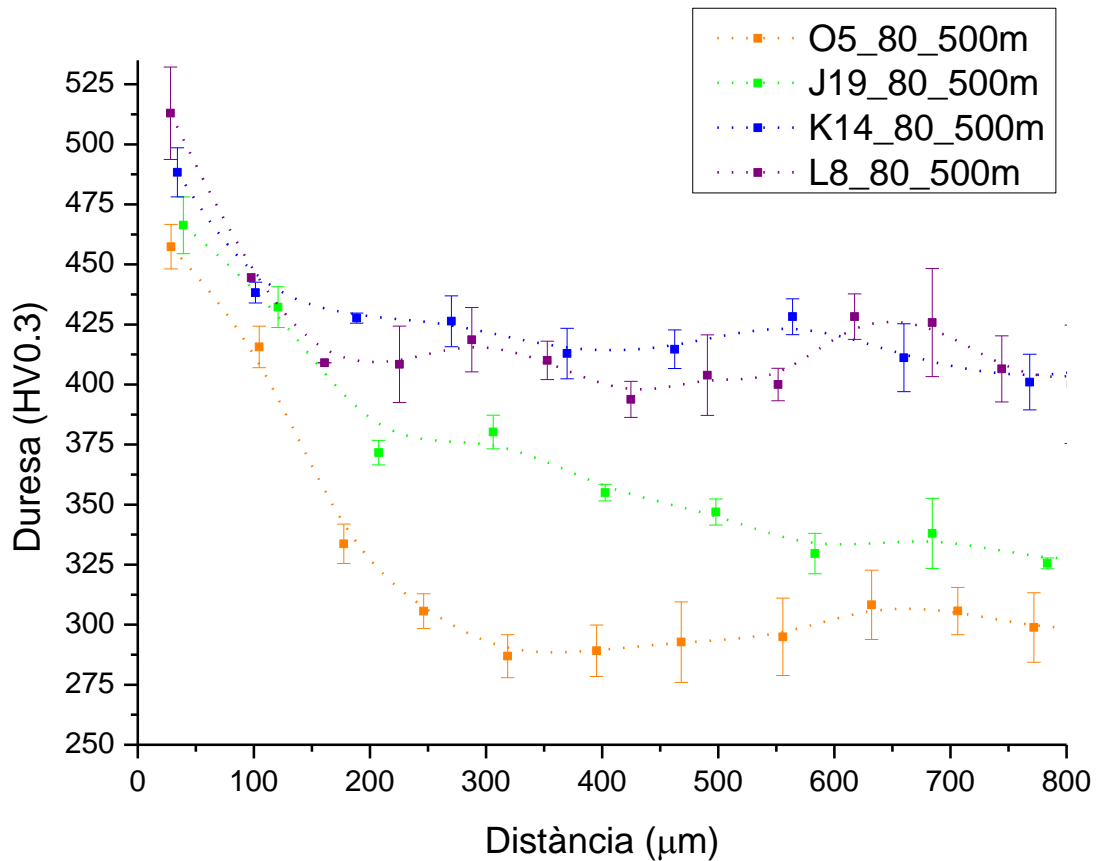


Figura 60. *Evolució de la duresa per als acers O, J, K i L assajats a 80N i 500 m.*

Per a la distància de 500 m, si que s'observen diferents valors de duresa més superficial, on per a l'acer O la duresa és de 460 HV0.3 mentre que per l'acer L és de 510 HV0.3. A mesura que augmenta la distància amb la superfície els valors divergeixen més, excepte en els acers K i L on ràpidament s'estabilitzen a partir de les 150 μm amb valors de duresa de 425 HV0.3.

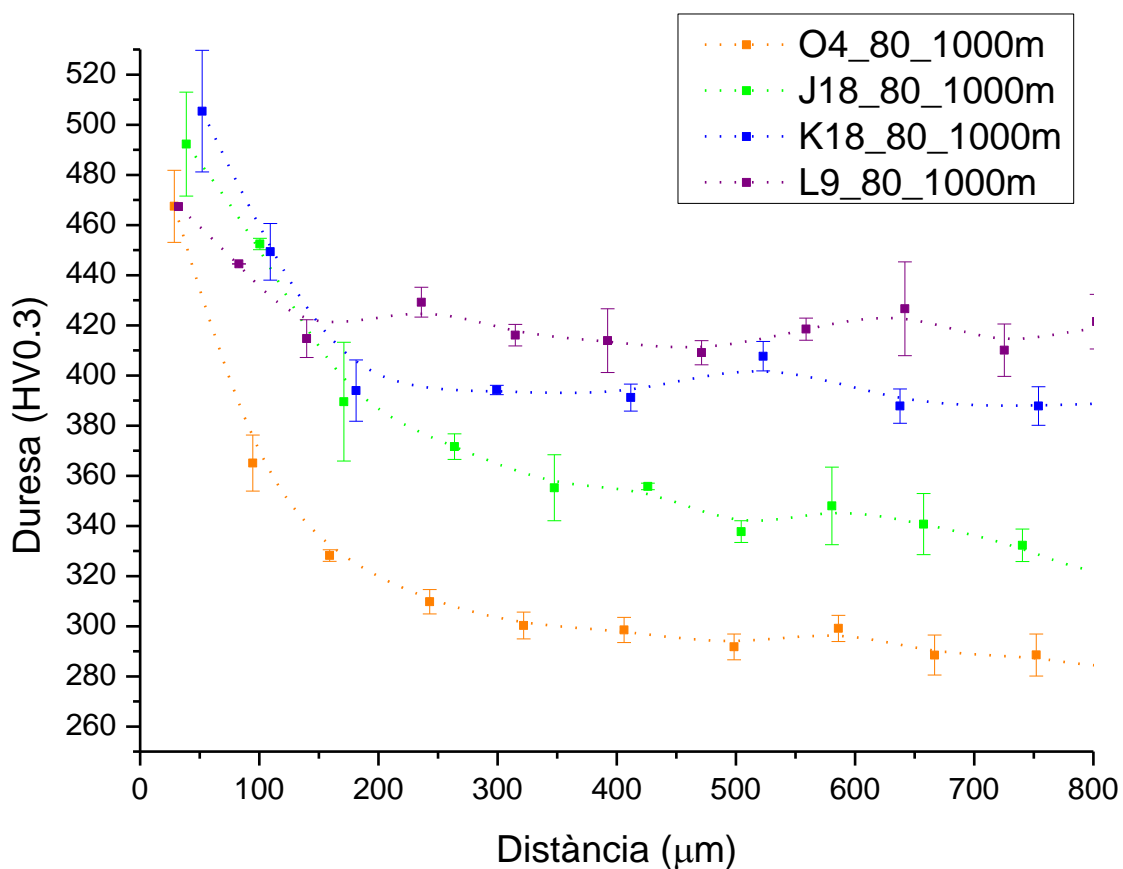


Figura 61. Evolució de la duresa per als acers O, J, K i L assajats a 80N i 1000 m.

Per a la distància de 1000m, s'observa també diferències en la duresa més superficial en funció del percentatge de martensita inicial, amb l'excepció de la mostra L9 que s'ha esmentat anteriorment.

3.2.4. Transformació de fase martensítica

Tot seguit es mostren els diferents espectres de difracció de raig-x i els percentatges de martensita i austenita que s'han obtingut a partir del procediment descrit en l'apartat *Difracció de Raig-X*, de les petjades de desgast per als acers J i K assajats a 10N.

- **Acer J**

Taula 20. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer J a 100m.

Acer J - 100m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
85,0	15,0

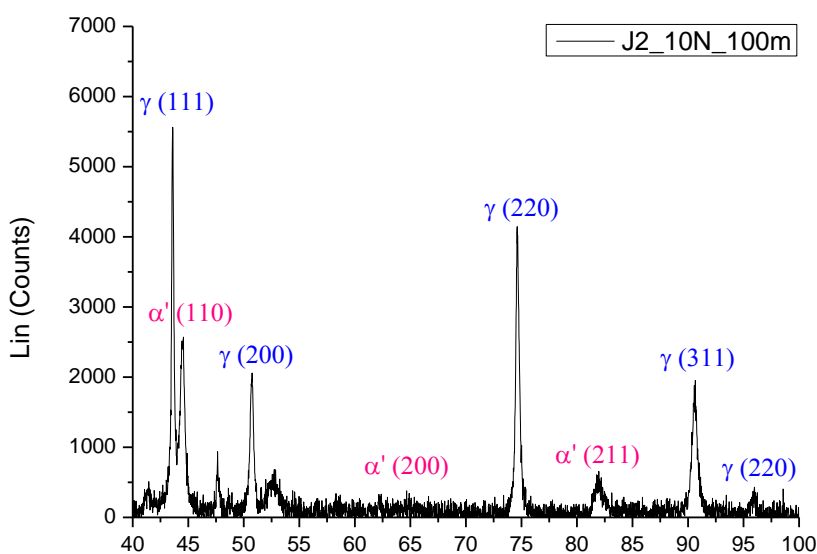


Figura 62. Espectre de fases de l'acer J a 100m.

Taula 21. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer J a 200m.

Acer J - 200m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
85,0	15,0

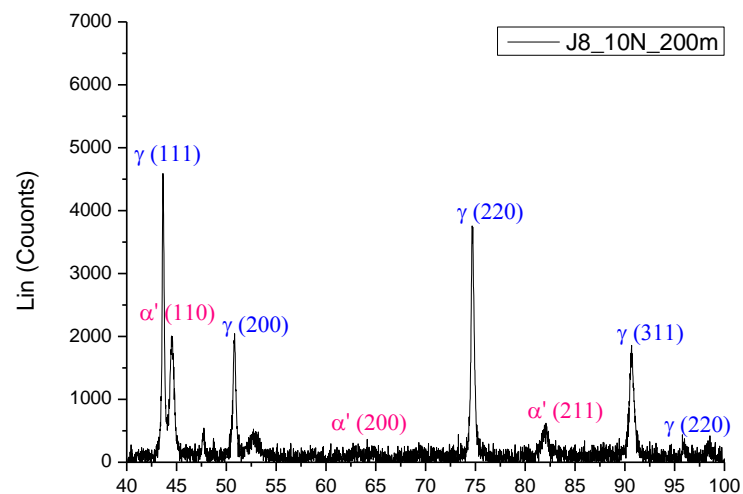


Figura 63. Espectre de fases de l'acer J a 200m.

Taula 22. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer J a 300m.

Acer J - 300m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
84,7	15,3

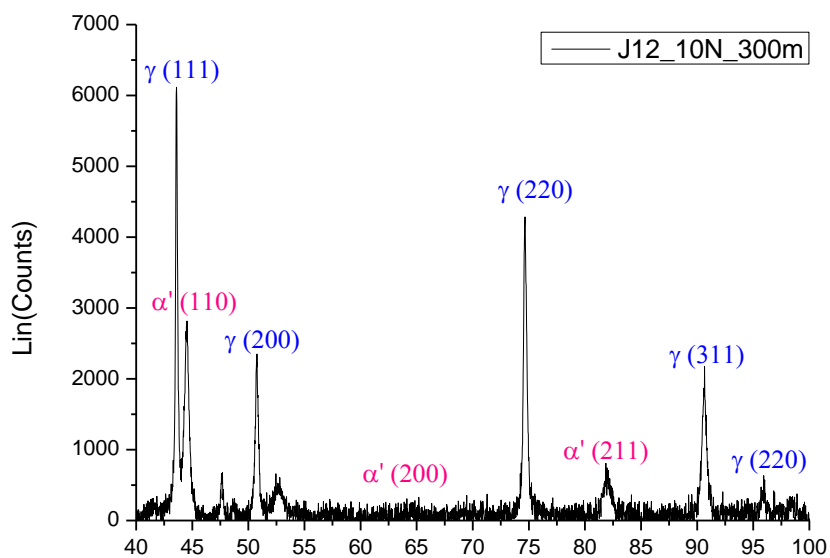


Figura 64. Espectre de fases de l'acer J a 300m.

Taula 23. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer J a 500m.

Acer J - 500m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
84,5	15,5

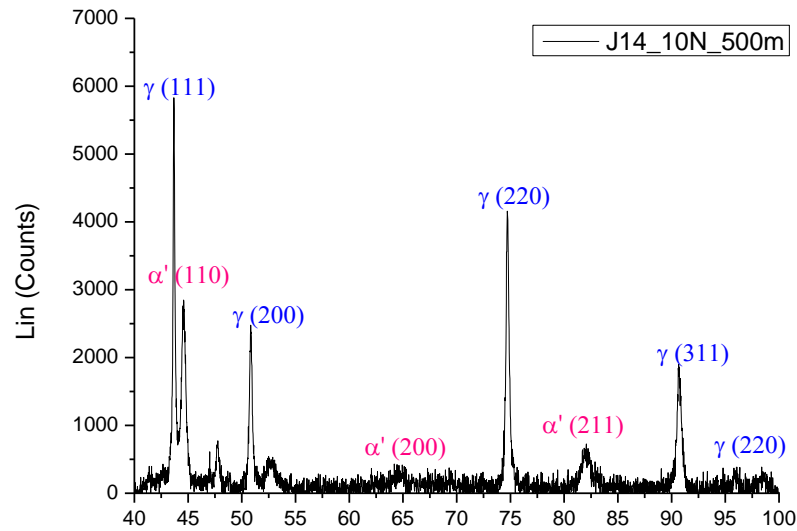


Figura 65. Espectre de fases de l'acer J a 500m.

Taula 24. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer J a 1000m.

Acer J - 1000m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
80,9	19,1

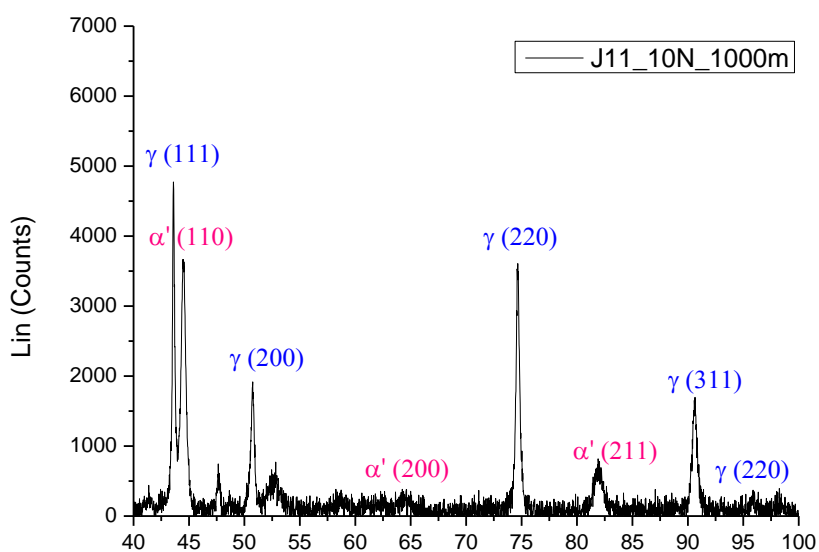


Figura 66. Espectre de fases de l'acer J a 1000m.

En la figura 69 podem veure com la transformació de la fase austenítica a martensita es manté gairebé constatat per a les diferents distàncies de recorregut estudiades. La mitjana és del $15.2\% \pm 0.19$.

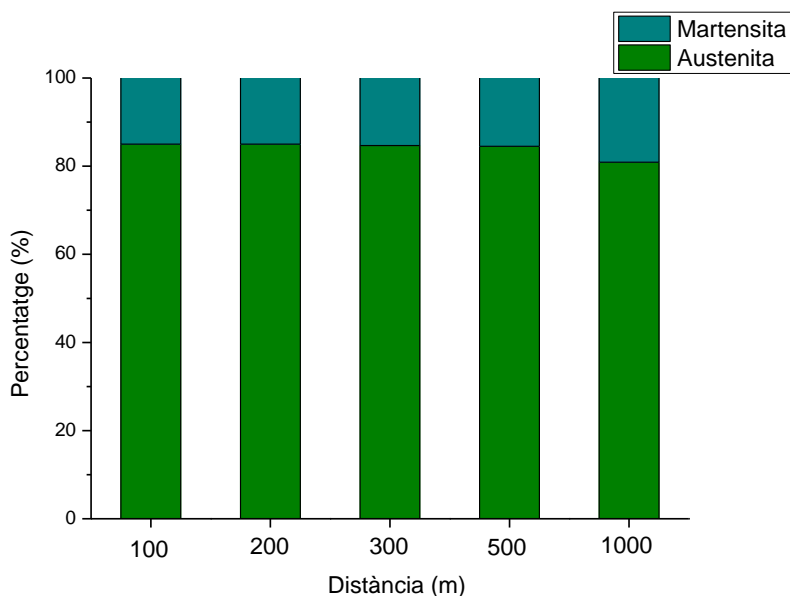


Figura 67. Evolució de la transformació martensítica per l'acer J.

- **Acer K**

Taula 25. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer K a 100m.

Acer K - 100m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
56,8	43,2

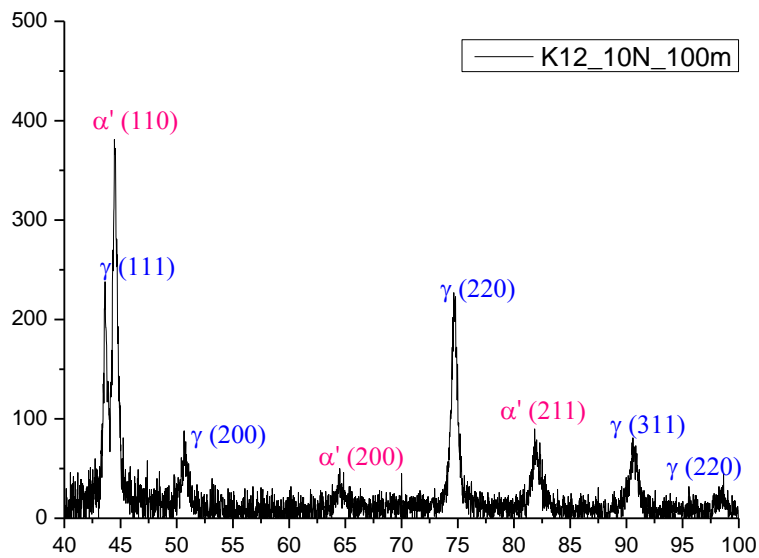


Figura 68. Espectre de fases de l'acer K a 100m.

Taula 26. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer K a 200m.

Acer K - 200m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
56,6	43,4

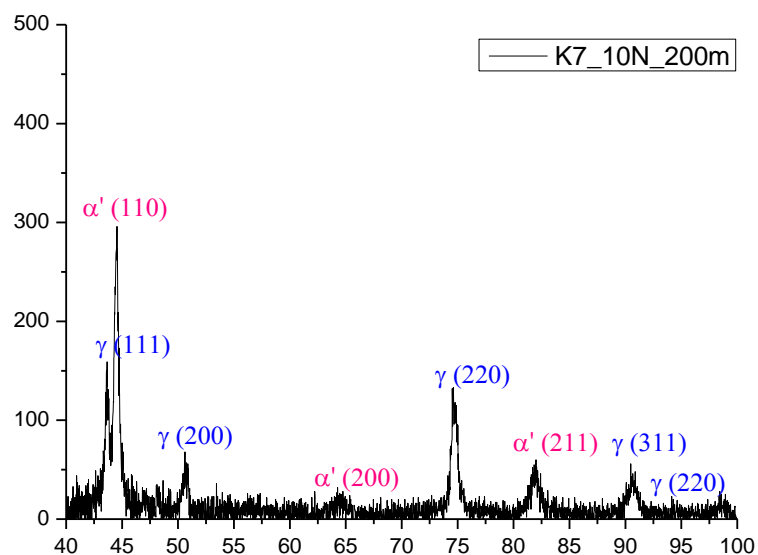


Figura 69. Espectre de fases de l'acer K a 200m.

Taula 27. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer K a 300m.

Acer K - 300m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
54,1	45,9

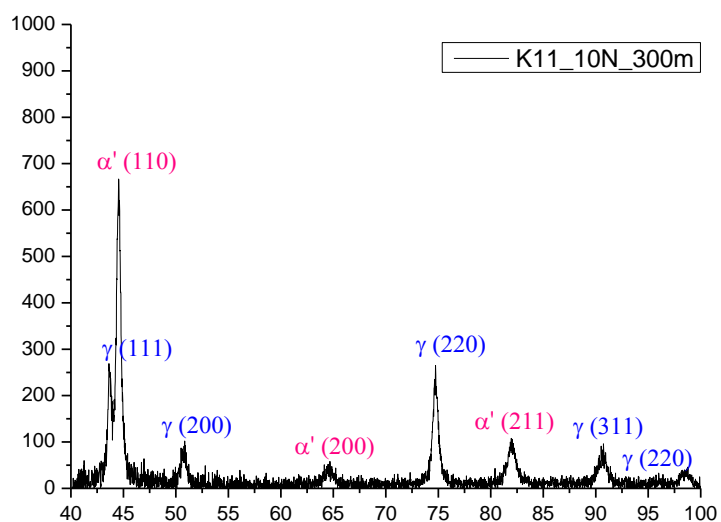


Figura 70. Espectre de fases de l'acer K a 300m.

Taula 28. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer K a 500m.

Acer K - 500m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
55,5	44,5

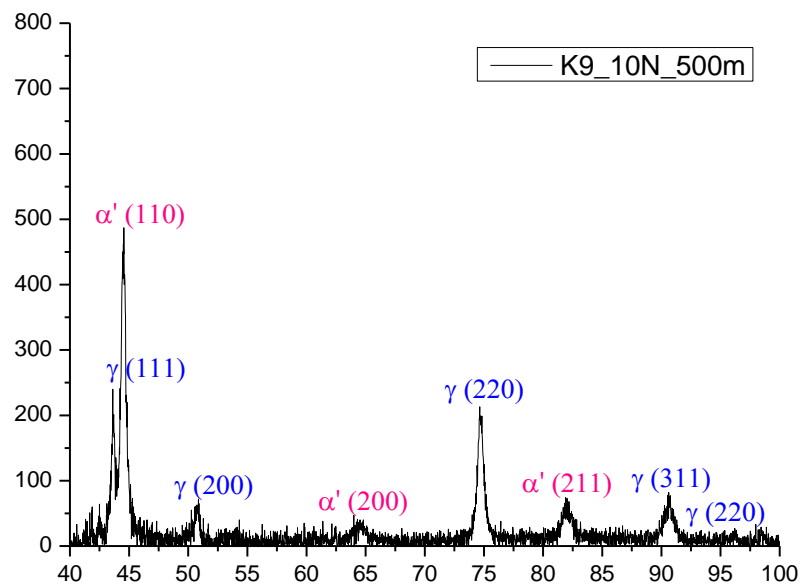


Figura 71. Espectre de fases de l'acer K a 500m.

Taula 29. Percentatge de fases austenítica i martensítica per l'acer K a 1000m.

Acer K - 1000m	
Austenita – γ (%)	Martensita – α' (%)
54,0	46,0

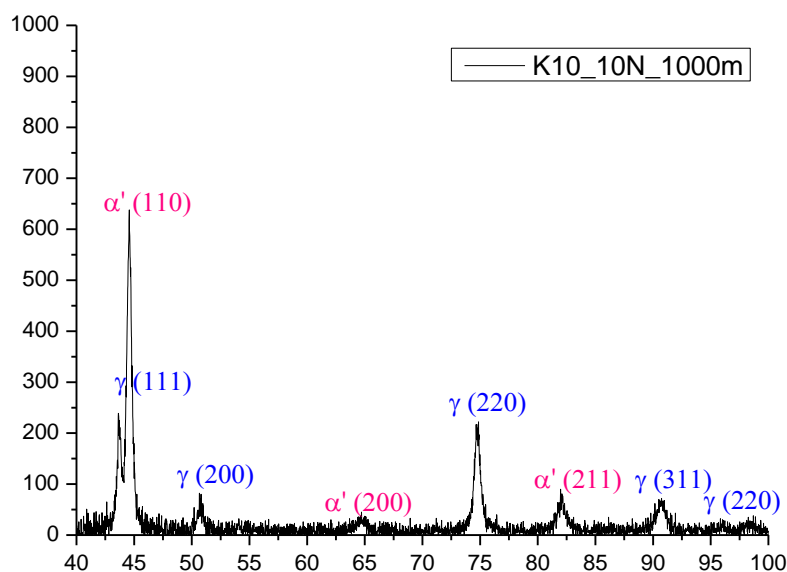


Figura 72. Espectre de fases de l'acer K a 1000m.

A partir de la figura 75 es pot comprovar que la formació de martensita per a la condició K no presenta canvis significatius al llarg de les diferents distàncies de recorregut i el percentatge de martensita és manté en un $44.4\% \pm 1.5$.

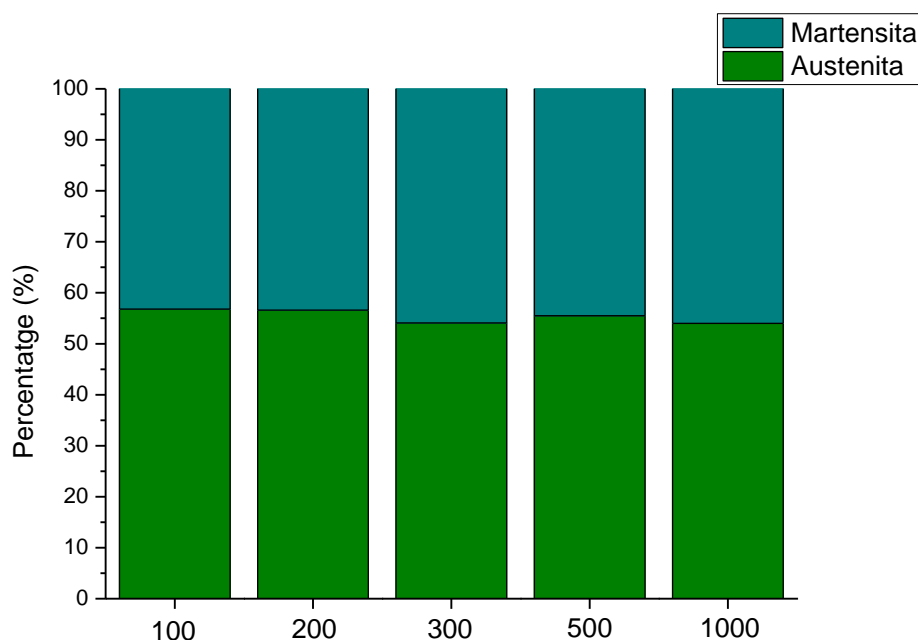


Figura 73. Evolució de la transformació martensítica per l'acer K.

En estudis previs [37] s'ha obtingut que el percentatge de martensita per l'acer O i L és de $8.3\% \pm 1.8$ i 61.8 ± 1.8 respectivament.

En la figura 74 es mostra de forma esquemàtica el percentatge de martensita obtingut per a cada condició en la petjada de desgast. Com es pot observar i tal i com s'ha indicat en les taules anteriors, el percentatge de martensita format durant l'assaig és més gran per les condicions que inicialment presenten també més martensita, acer K i L. Tot i així, si es fa la relació d'aquest percentatge respecte del que ja presenta cada condició abans de l'assaig, s'obté que l'acer O i J superen en més d'un 50 % la quantitat de martensita formada durant l'assaig mentre que l'acer K i L tan sols arriben a uns percentatges propers al 30 %. Malgrat aquesta comparativa, cal destacar que la formació de martensita no augmenta a mesura que les distàncies de recorregut són més llargues fet que indica que en el cas de les condicions O i J, gran part de la deformació plàstica provocada pel pin queda absorbida per l'enduriment dels grans austenítics.

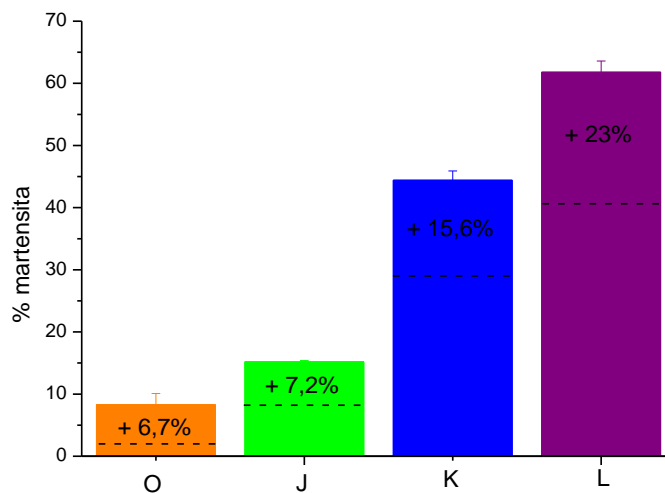


Figura 74. Percentatge de martensita mesurat en la petjada de desgast per a cada condició d'acer estudiada. En la línia discontinua s'indica el percentatge de martensita inicial previ a l'assaig de desgast i l'augment que experimenta degut a l'assaig de desgast.

3.2.5. Mecanisme de desgast

En la figura 75 es mostra una micrografia corresponent a una petjada per a l'acer J després de 100 m de recorregut a una càrrega de 80N. Es poden diferenciar clarament dues tonalitats. Per tal d'identificar quina d'elles és la que correspon a la zona en la què s'ha format l'òxid, s'ha dut a terme una anàlisi semi-quantitativa tenint en compte dos elements químics: oxigen i ferro en una zona concreta de la petjada (figura 76).

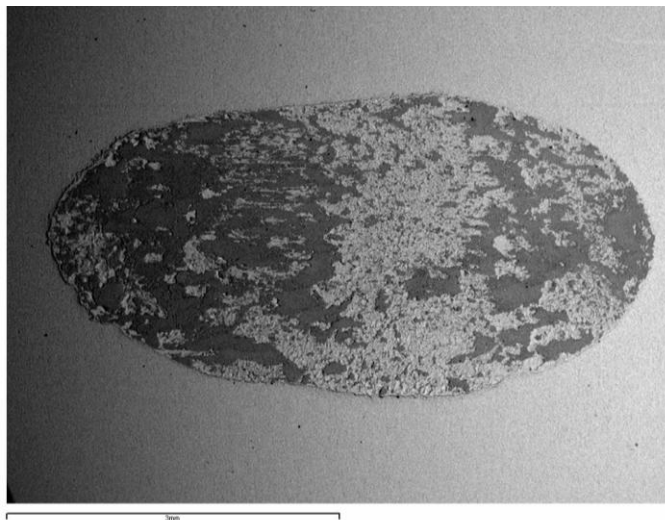


Figura 75. Aspecte de la petjada de desgast per microscòpia electrònica de rastreig per a una mostra de la condició de l'acer J després de 80N i 100m de recorregut.

Com es pot observar en la figura 76, la zona amb una tonalitat més clara és rica en ferro ja que hi ha una densitat més grans de puntets blancs fet que indica una major presència d'aquest element en aquesta zona. Per altra banda, la zona amb una tonalitat més fosca és més rica en oxigen i com a conseqüència correspon a la zona en la què hi ha més presència d'òxid. La formació d'aquest òxid és deguda a l'acció repetida del pin sobre la superfície del material. El fet que no aparegui en tota la petjada és degut a que durant el recorregut del pin s'arrenca part d'aquest òxid quedant metall "nou" en contacte amb el medi, aquest al llarg de l'assaig tornarà a convertir-se en òxid el qual després serà arrencat de nou pel pin. Aquest mecanisme té lloc de forma continuada i és el que es coneix com a tribocorrosió. Cal destacar que l'aparença de les provetes és similar per a la resta de condicions de l'acer estudiades.

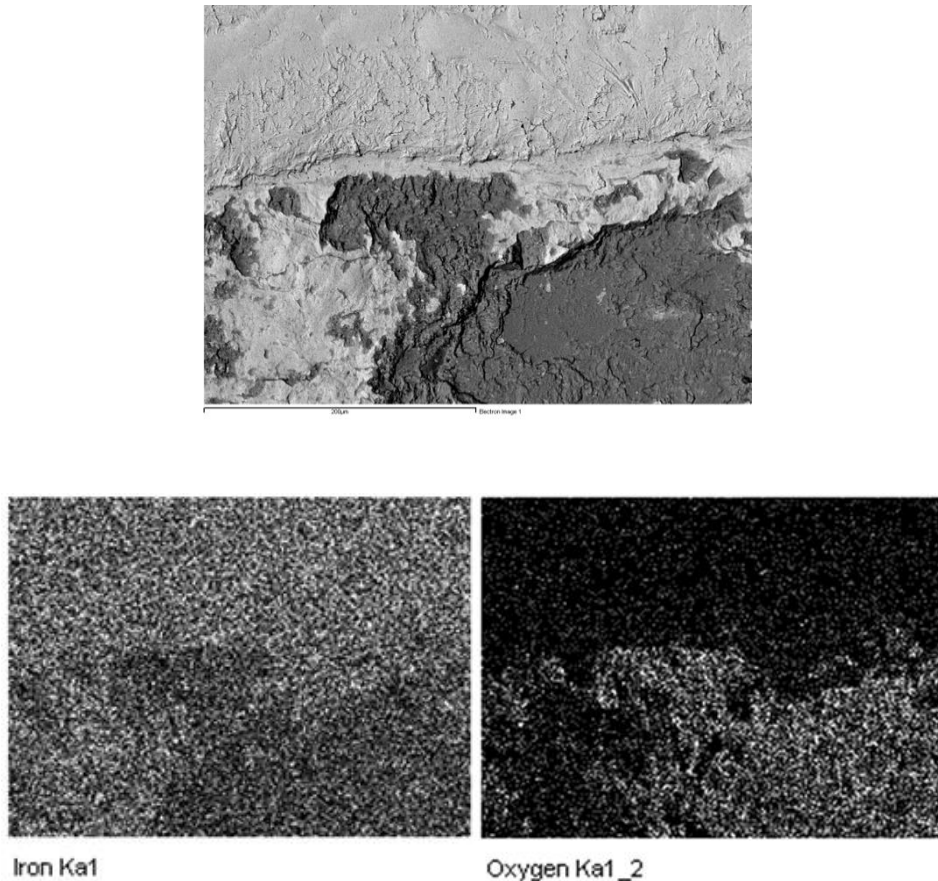


Figura 76. *Detall de la petjada de la figura 75 acompanyat de dues micrografies en les que es mostra la presència de ferro i oxigen.*

L'existència del mecanisme de tribocorrosió es fa evident si es tenen en compte les micrografies obtingudes per a les petjades de 500 i 1000m, figura 76. Com es pot observar, tot i que les distàncies de recorregut siguin més llargues, l'òxid que es forma no cobreix tota la petjada sinó que es continuen identificant clarament en les dues mostres les zones clares i fosques. Una altre aspecte a destacar és que les zona central de les petjades és la que es presenta amb menor quantitat d'òxid, metre que aquest s'acumula més en els extrems. Aquest fenomen es deu a què en la zona central és on s'acumula més el desgast i on continuadament es arrencat i transportat cap els extrems. En allà, l'acció del pin és menor i no s'arrenca l'òxid amb tanta facilitat. Aquesta observació, tot i que es pugui aplicar per a les tres distàncies, passa a ser menys important a mesura que la distància recorreguda és més llarga ja que en aquest cas l'acció perllongada del pin afavoreix que les partícules d'òxid s'acabin arrencant.

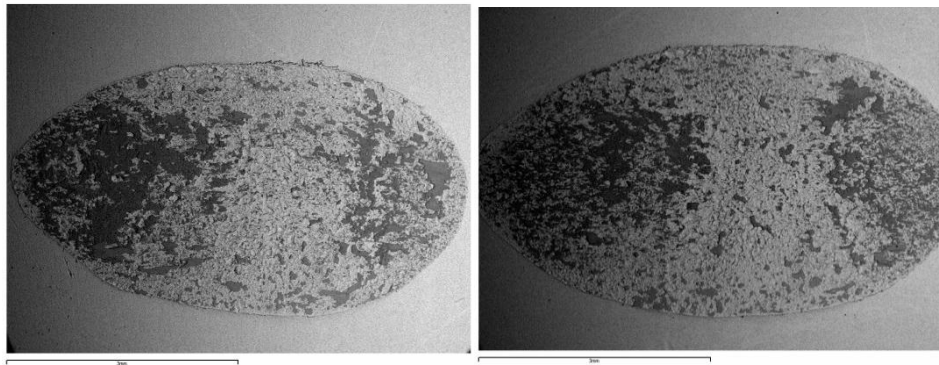


Figura 77. Aspecte de les petjades de desgast obtingudes mitjançant microscòpia electrònica de rastreig per a l'acer J després de 500 i 1000m de recorregut a 80N.

CAPÍTOL 4:

CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquest projecte ha estat analitzar com afecta a la resistència al desgast la presència de diferents quantitats de fase martensítica inicial en l'acer inoxidable austenític metastable EN 1.4318. Per aquest motiu, s'han avaluat quatre condicions inicials de l'acer, una de recuit i tres de laminat en fred amb diferents percentatges de reducció. Tot seguit s'esmenten les conclusions més rellevants d'aquest projecte:

- En les quatre condicions de l'acer estudiades s'observa que a mesura que augmenta la distància recorreguda, també augmenta la pèrdua de pes i el volum desgastat. Comparant les quatre condicions entre si, s'observa que la presència de martensita inicial provoca una disminució de la resistència al desgast.
- La velocitat de desgast és major per a les condicions que tenen més quantitat de martensita inicial. Tot i així cal ressaltar que a mesura que la distància recorreguda és més gran la velocitat de desgast tendeix a estabilitzar-se.
- Pel que fa a l'anàlisi de les petjades de desgast, comparant les diferents condicions s'ha observat que a mesura que augmenta la presència de martensita inicial, disminueix també el volum dels apilaments, fet que es deu a la disminució de la ductilitat que provoca la fase martensítica i la pèrdua de la capacitat per a deformar plàsticament. Per altra banda, en totes les condicions s'observa que el volum dels apilaments per a 1000m és inferior que per a 100m, degut al fet que el propi desgast provoca un enduriment significatiu de la superfície.

- El coeficient de fricció es manté constant per a totes les condicions i al llarg de la distància amb valors que varien entre 0,35 i 0,90 per a 10N.
- La tècnica de difracció de raig-X ha permès observar que en les petjades de desgast el percentatge martensita es manté constant al llarg de la distància d'assaig, per tant la major part d'aquesta transformació es produeix en els primers 100 metres de desgast.
- L'anàlisi del perfil de dureses realitzat sota la petjada ha permès determinar que per l'acer amb les dues condicions que contenen els percentatges inicials de martensita més baixos, inferior al 10%, presenten un enduriment de la superfície que arriba fins a les 250 μm . En canvi quan el percentatge inicial de martensita és més elevat, fins el 38%, l'enduriment tan sols s'observa fins a les 150 μm .
- Les micrografies obtingudes a partir de microscòpia electrònica de rastreig posen de manifest que el mecanisme predominant per a les condicions de desgast estudiades és la tribocorrosió. Aquest mecanisme s'ha observat que es desenvolupa de forma similar per a les diferents condicions de l'acer estudiades independentment del percentatge inicial de martensita.

CAPÍTOL 5:

PRESSUPOST

	Unitats	Preu unitari	Cost total [€]
Utilització de la maquinària			
Mecanitzat amb ciselladora	50	1€/proveta	50,0
Tribòmetre	400 h	50 €/h	20.000,0
Rugosímetre	40 h	15 €/h	600,0
Perfilòmetre	8 h	45 €/h	360,0
Microscopi òptic confocal	3 h	20 €/h	60,0
Polidora automàtica	5 h	10 €/h	50,0
Encastadora	5 h	8 €/h	40,0
SEM	3 h	100 €/h	300,0
Difracció raig-X	10	55€/mostra	550,0
Talladora Struers	6 h	10 €/h	60,0
Microduròmetre	50 h	30 €/h	1.500,0
			23.570,0 €

Material			
Pin d'Acer	10 u	1,5 €/unitat	15,0
Suport de mostres	1 u	200 €/unitat	200,0
Resina Polyfast	0,2 kg	250 €/kg	50,0
Draps de polir	3 u	80 €/unitat	240,0
			505,0 €

Honoraris			
Tutor	50 h	60 €/h	3.000,0
Tècnic de Laboratori	10 h	50 €/h	500,0
Projectista	500 h	30 €/h	15.000,0
			18.500,0 €

TOTAL DEL PROJECTE	42.575,0 €
---------------------------	-------------------

CAPÍTOL 6:

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pero-Sanz Elorz, J. A. Aceros: metalurgia física, selección y diseño.
- [2] Columbier y Hochmann. 1965. Aceros inoxidables, Aceros refractarios. Ediciones URMO. :29-138.
- [3] Boletín Tècnico, Nomenclatura de acers. TUBOCOBRE S.A. http://www.tubocobre.net/literatura_pdf/cobre_nomenclatura_acero.pdf (Gener 2014)
- [4] Euro Inox. Stainless Steel: Tables of Technical Properties. Second Edition 2007. Materials and Applications Series, Volume 5.
- [5] Hedström, P. Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301. Luleå University of Technology.
- [6] A.L. Schaeffler, Metal progress 56 (1949) 680.
- [7] Callister W. D. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales. Editorial Reverté. 2000.
- [8] Kpodekon, C. Effet du pré-écrouissage sur la durée de vie d'aciers austénitiques de type 304L. 2010. Ecole Doctorale SPMII. Insitut National des Sciences Appliquées de Rouen.
- [9] Zapata Dederle, A. C. Mecanismos de deformación en aceros inoxidables austeníticos metaestables. Proyecto de Tesis Doctoral. 2010. Barcelona, UPC.
- [10] Talonen, J. Hänninen, H. Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels. October 2007. Helsinki University of Technology.
- [11] Zapata, A. Fargas, G. Mateo, A. Effect of cold rolling on the high cycle fatigue behaviour of an AISI 301LN Stainless steel. Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol. 1 (2011).

- [12] Reed Hill, R. Principios de Metalurgia Física. México, 2da Edición. Editorial CIESA (1986).
- [13] Wikipedia, La enciclopedia libre. Tribología. 15 de Gener de 2014.
[<http://es.m.wikipedia.org/wiki/Tribolog%C3%Ada>]
- [14] Donald R. Askeland. 2001. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Paraninfo Thomson Learning. :736-738.
- [15] Ludema, K.C. Friction, Wear, Lubrication, a text in tribology. University of Michigan. 1996.
- [16] Bhushan, B. Kennedy, F. E. Szeri, A. Z. Modern Tribology Handbook, Volume 2. Materials Coatings, and Industrial Applications. 2001.
- [17] Szyndelman, G. Comportamiento tribológico de los aceros inoxidables duplex 2205. Master Thesis. UPC.
- [18] Fargas, G. Apunts Acabats i Recobriments Superficials. EUETIB, 2013.
- [19] Bregliozzi, G.; Di Schino, A.; Kenny, J.M.; Haefke, H. The influence of atmospheric humidity and grain size on the friction and wear of AISI 304 austenitic stainless steel. Materials Letters 57 (April 2003) 4505-4508.
- [20] Bregliozzi, G.; Di Schino, A.; Kenny, J.M.; Haefke, H. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes. Wear 258 (2005) 503-510.
- [21] Reza Batani, M.; Szpunar, J.A.; Wang, X.; Li, D.Y. Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel. Wear 260 (2006) 116-122.
- [22] Yong-Suk Kim; Seung-Duk Kim; Sung-Joon Kim. Effect of phase transformation on wear of high-nitrogen austenitic 18Cr-18Mn-2Mo-0.9N steel. Materials Science and Engineering A 449-451 (2007) 1075-1078.
- [23] Morteza Zandrahimi, M.; Reza Batani, A.; Poladi, J.A.S. The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel. Wear 263 (2007) 674-678.
- [24] Farias, M.C.M.; Souza, R.M.; Sinatora, A.; Tanaka, D.K. The influence of applied load, sliding velocity and martensitic transformation on the unlubricated sliding wear of austenitic stainless steels. Wear 263 (2007) 773-781.
- [25] Meng Hua; Xicheng Wei; Jian Li. Friction and wear behavior of SUS 304 austenitic stainless steel against Al₂O₃ ceramic ball under relative high load. Wear 265 (2008) 799-810.
- [26] Myung Chul Park; Ki Nam Kim; Gyeong Su Shin; Seon Jin Kim. Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe-Cr-Ni-C alloys. Wear 274-275 (2012) 28-33.
- [27] Parthasarathi, N.L.; Utpal Borah; Albert, S.K. Effect of temperature on sliding wear of AISI 316 L(N) stainless steel – Analysis of measured wear and surface roughness of wear tracks. Materials and Design 51 (2013) 676-682.
- [28] Mejía, I.; Bedolla-Jacinde, A.; Pablo, J.R. Sliding wear behavior of a high-Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb. Wear 301 (2013) 590-597.
- [29] Stainless Steel Grade Datasheets, Atlas Steels (November 2011).
- [30] Ana Mª Duran Avites. Efecto de la predeformación en la vida a fatiga de un acer inoxidable austenítico metaestable. PFC. ETSEIB (UPC) 2009.

- [31] Hinojosa, M. Reyes, M. E. La rugosidad de las superficies: Topometría. Ingenierías. (Abril-Juny 2001). Vol. IV, Núm. 11.
- [32] Veeco Instruments Inc. Dektak 150 Surface Profiler. [http://www.upc.edu/sct/documents_equipment/d_81_id-399.pdf] (2009)
- [33] Narváez, D. J. La Microscopía: Herramienta para estudiar células y tejidos. [http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo6_7.htm]
- [34] ASM Handbook Committee. Volume 4 of the ASM Handbook: Heat Treating. ASM International. The Materials Information Company (1991).
- [35] Materials Evaluation and Engineering, Inc. Handbook of analytical methods for materials. Scanning Electron Microscopy. [<http://mee-inc.com/sem.html>] (2009).
- [36] Caracterización de Materiales Cristalinos. [<http://www.ehu.es/imacris/PIE06/web/DRXP.htm>] (Última actualización: 25/09/2006).
- [37] Roger Vilanova Garcia. Comportament mecànic d'acer inoxidable austenítics metaestables. TFG. (UPC) 2014.